

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Koordinace signálních plánů při trojúhelníkové konfiguraci křižovatek

Signal Plans of Crossroads Triangle Type Configuration Temporal
Coordination

Student:

Bc. Tomáš Miklovič

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Miklovič**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 20 Silniční doprava
Téma: **Koordinace signálních plánů při trojúhelníkové konfiguraci křižovatek**
Signal Plans of Crossroads Triangle Type Configuration Temporal Coordination

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Provéřít uplatnitelnost metod lineárního programování při řešení časové koordinace signálních plánů při trojúhelníkové konfiguraci křižovatek. Provéřít účinnost koordinace v závislosti na vybraných topologických parametrech okolní sítě.

Osnova práce:

1. Úvod.
2. Význam koordinace signálních plánů pro řízení dopravy.
3. Teoretická východiska řešení.
4. Výpočetní experimenty se sestavenými modely.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČERNÝ, J.; KLUVÁNEK, P.: Základy matematické teorie dopravy. Bratislava: VEDA. 1990. 279 s.
ISBN 80-224-0099-8


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Miklovič

Adresa trvalého pobytu autora práce: Holčovice 200 okr. Bruntál

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

Poděkování

Poděkování patří především vedoucímu diplomové práce Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za jeho ochotu a trpělivost při konzultacích k diplomové práci.

Rád bych také poděkoval panu Ing. Filipu Treslerovi za pomoc a konzultace při tvorbě diplomové práce a tvorbu grafického zpracování výsledků návrhu signálních plánů.

Poděkování náleží rovněž Ing. Michalu Ruskovi za průběžnou konzultační činnost ke zpracovávanému tématu.

Bc. Tomáš Miklovič

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Koordinace signálních plánů při trojúhelníkové konfiguraci křižovatek Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB Technická univerzita Ostrava, 2011, 83 s. Diplomová práce, vedoucí: Teichmann, D.

Předložená diplomová práce je věnována problematice plošné koordinace křižovatek. V první části práce jsou popsány obecné zásady řízení provozu na křižovatkách, dále je popsána soustava řešených křižovatek a jejich stavební uspořádání. V dalších částech práce je uveden obecný popis matematického modelu včetně podkladů potřebných k řešení daného problému. Následuje vyhodnocení a zpracování potřebných výchozích údajů a vlastní tvorba modelu, včetně jeho transformace do podoby potřebné pro řešení v optimalizačním software Xpress-IVE. V další části práce jsou provedeny experimenty ze sestavenými modely. Tyto experimenty mají za úkol prověření použití matematických modelů pro síťovou koordinaci. V závěru experimentů je stanoveno pásmo koordinovatelnosti. Z výsledků daných experimentů jsou také navrženy signální plány pro řízení křižovatek v trojúhelníkovém uspořádání.

Signal coordination plans for the triangular configuration of the intersections Ostrava: Institute of Transport, Faculty of Mechanical Engineering VŠB Technical University of Ostrava, 2011. 83 p. Thesis, Supervisor: Teichmann, D.

This thesis is dedicated to the coordination of planar junction crossroads. The first section describes the general principles of traffic control at intersections, as described system solved the junctions and their structural arrangement. The other part contains a general description of the mathematical model, including the documents needed to solve the problem. The following evaluation and processing of the data source and custom creation of models, including its transformation into the form needed for solving the optimization software Xpress-IVE. In the next section are drawn from experiments performed models. These experiments are designed to verify the use of mathematical models for network coordination. The results of the experiments are designed to signal plans for the management of intersections in a triangular arrangement.

OBSAH

PODĚKOVÁNÍ.....	5
ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	6
OBSAH.....	7
SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	9
1 ÚVOD.....	11
1.1 Teorie řízení křižovatek	12
1.2 Vyšší formy řízení křižovatek.....	19
2 KOORDINACE ŘÍZENÍ KŘIŽOVATEK.....	21
2.1 Princip zelené vlny.....	21
2.1.1 Progresivní rychlost.....	22
2.1.2 Délka cyklu a vzdálenost dělicích bodů.....	22
2.2. Schnabelova translační metoda	24
2.3 Signální trychtýř.....	26
2.4 Plošná koordinace.....	27
2.4.1 Koordinace dvou křižujících se tahů se zelenou vlnou.....	28
2.4.2 Koordinace na komunikacích tvořících uzavřený obrazec.....	28
2.4.3 Vazby mezi skupinami koordinovaných křižovatek.....	29
3 TEORETICKÁ VÝCHODISKA ŘEŠENÍ.....	30
3.1 Lineární modely pro návrh signálního plánu.....	30
3.1.1 Výběr a stanovení pořadí fází.....	31
3.1.2 Příprava vstupních dat.....	35
3.1.3 Optimalizační kritéria.....	36
3.1.4. Matematický model	36
4 VÝPOČETNÍ EXPERIMENTY SE SESTAVENÝMI MODELÝ.....	37
4.1 Charakteristika řešené lokality.....	37
4.2 Plán experimentů.....	51
4.3 Řešení matematického modelu soustavy křižovatek v software Xpress-IVE.....	52
4.3.1 Obecné zásady pro transformaci matematického modelu do textu programu Xpress-IVE.....	52
4.3.2 Text programu řešícího řešícího model pro minimalizaci délky cyklu.....	55

4.3.3	Text programu řešícího řešícího model pro maximalizaci minimální rezervy.....	63
4.3.4	Experimenty související se změnami vzdáleností mezi křižovatkami.....	73
4.3.5	Experimenty za účelem zjištění průběhu hodnoty minimální poměrné rezervy v přípustném pásmu doby jízdy mezi křižovatkami.....	76
5	ZHPODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	80
6	ZÁVĚR.....	82
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	83

Seznam použitého značení

apod.....	a podobně
atd.....	a tak dále
tzn	to znamená
č.....	číslo
ČSN.....	České státní normy
TP 81.....	Technické podmínky- Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu
h.....	hodina
j.v.....	jednotkové vozidlo
j.v./ h.....	jednotkové vozidlo za hodinu
m.....	metr
ms ⁻¹	metr za sekundu
obr.....	obrázek
s.....	sekunda
SSZ.....	světelné signalizační zařízení
tab.....	tabulka
VŠB – TUO.....	Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava
tab.....	tabulka
c.....	délka cyklu
t _z	nutná doba zelené fáze
t _m	rozhodující (nejdelší) mezičas mezi fázemi následujícími po sobě [s]
t _v	vyklizovací doba [s]
t _n	najížděcí doba [s]
t _b	bezpečnostní doba [s]
L _v	vyklizovací dráha [m]
L _n	najížděcí dráha [m]
L _{voz}	délka vyklizujícího vozidla [m]
v _v	vyklizovací rychlost [m.s ⁻¹]
v _n	najížděcí rychlost [m.s ⁻¹]
Y	součet stupňů saturace všech fází Y
Y _{prak}	prakticky možná maximální hodnota Y

L celkový ztrátový čas během cyklu
 l_m vzdálenost dělicích bodů
 n přirozené celé číslo ($n = 1, 2, 3, \dots$)
 p fázový posun (s)
 s vzdálenost rychlostního návěstidla od první křižovatky (m)
 \check{c} doba červeného signálu na první křižovatce (s)
 v_{min} nejnižší rychlost použita na rychlostním návěstidle ($m.s^{-1}$)
 v_{max} nejvyšší rychlost na rychlostním návěstidle ($m.s^{-1}$)
 x je počet vrcholů uzavřeného obrazce křižovatek, v nichž se protínají zelené vlny
 ($x = 1, 2, \dots, k$)
 y počet stran obrazce
 z_{xy} zelená doba vjezdu do křižovatky x z vjezdu y (s)
 $t_{m,xy+y+1}$ mezičas na křižovatce x mezi fázemi vjezdu z úseku y a z úseku $y+1$ (s)
 t_y doba jízdy po úseku y mezi křižovatkami x a $x+1$ (s)
 I množina proudů
 J množina fází
 W_j proměnná modelující rozhodnutí, zda bude či nebude fáze j zahrnuta do výsledného
 fázového modelu
 $a_{i,j}$ prvek proudové fázové matice, který modeluje skutečnost, zda proud i je ($a_{i,j} = 1$) či není
 ($a_{i,j} = 0$) zařazen ve fázi j .
 τ_{ki} doba potřebná pro vstup jednotkového vozidla do křižovatky z proudu I
 x_i začátek vstupu proudu I do křižovatky
 y_i konec vstupu proudu I do křižovatky
 $y_i - x_i$ doba zelené pro proud I
 t_{ki} minimální doba zelené pro proud i z I
 q_{ki} intenzita vozidel proudu i z I vyjádřená v jednotkových vozidlech za hodinu
 u minimální poměrná rezerva
 m_{kij} mezičas, to je doba, která musí uplynout mezi koncem vstupu j – tého proudu a začátkem
 vstupu k – tého proudu do i – té křižovatky (stanoveno pro dvojice kolizních proudů)
 t_{vj} čas vjezdu $j.v.$ do křižovatky
 t_{vyk} doba potřebná pro vyklizení kolizního prostoru pro $j.v.$
 $T1, T2, T3$ doba jízdy mezi křižovatkami $j.v.$

1 ÚVOD

V poslední době je ve světě patrný rozmach individuální dopravy, který klade zejména v zastavěných územích vysoké nároky na kapacitu dopravní infrastruktury. S tímto je také spjat problém účinného řízení provozu na pozemních komunikacích, zejména v uzlech dopravních sítí, např. křižovatek. Dosáhne-li intenzita dopravy na křižovatce určité hodnoty, zavádí se k řízení provozu světelné signalizační zařízení.

Pro návrh světelného řízení křižovatek bylo sestaveno mnoho metod. Nejčastěji se používají metody uvedené v Technických podmínkách TP 81. Dostupná odborná literatura se zpravidla věnuje pouze návrhům signálních plánů pro izolované křižovatky, maximálně pro soustavy křižovatek řazených v linii. Stále aktuálnější, s ohledem na dnešní stupeň automobilizace, se stává problematika koordinace plošné. O řešení problému plošné koordinace se však dostupná odborná literatura zmiňuje jen útržkovitě, kdy tuto variantu koordinace zmíní a dále již uvedený problém příliš nerozebírá. Tento fakt je odůvodňován především složitostí plošné koordinace.

Cílem předložené diplomové práce je zabývat se problematikou plošné koordinace v podmínkách konkrétní konfigurace světelně řízených křižovatek. Jelikož se dostupná literatura nezmiňuje o žádné vhodné metodě, byly k řešení problému zvoleny metody matematického programování, konkrétně pak metoda vyvinutá řešitelským týmem prof. RNDr. Jana Černého, Dr., Dr.h.c z Výzkumného ústavu dopravního v Žilině.

Zvolený model matematického programování má prověřit uplatnitelnost metod lineárního programování při řešení časové koordinace signálních plánů při trojúhelníkové konfiguraci křižovatek a v této souvislosti prověřit účinnost koordinace v závislosti na vybraných topologických parametrech okolní sítě pozemních komunikací.

1.1 Teorie řízení křižovatky

Podstatou světelného řízení křižovatky je střídavé povolování vstupu jednotlivým dopravním proudům, které jsou navzájem kolizní (to znamená, že při průjezdu křižovatkou mají jejich trajektorie pohybu kolizní body). Při řízení provozu na křižovatce je průjezd vozidel z různých vjezdů do křižovatky povolen v předem známých časových úsecích odděleně tak, že při respektování návěstí na světelném signalizačním zařízení nemůže dojít k vzájemným kolizím. Výhody světelného řízení křižovatky spočívají v tom, že hlavní proud periodicky zastavuje na červený signál a tím umožní průjezdy křižovatkou přijíždějícím vozidlům z vedlejších směrů. V další fázi se přidělí volný průjezd vozidlům, která se shromáždila v hlavním směru ve frontě s minimálním časovým rozestupem a mohou plynule projíždět křižovatkou. Při bezchybném návrhu signálního plánu stačí doba zelené přidělená směrům odbavit veškerá vozidla přijíždějící po hlavní komunikaci do křižovatky.

Hlavní výhodou zavedení světelného signalizačního zařízení k řízení křižovatky je zvýšení bezpečnosti provozu při průjezdu křižovatkou. Zkušenosti z velkých světových měst dokazují, že v důsledku zavedení SSZ na křižovatkách se výskyt dopravních nehod v křižovatkách sníží až o 40% [1].

Další výhodou, která je však vázána na správné použití světelné signalizace, je snížení průměrného zdržení, které připadne jednotlivým vozidlům při průjezdu křižovatkou. Význam snížení průměrného zdržení vozidel lze vyčíslit například z pohledu mezd řidičů, úspory času cestujících v prostředcích městské hromadné dopravy a rychlejší přepravy zboží.

Velice důležitým aspektem, který přináší zavedení světelného signalizačního zařízení, je snížení spotřeby paliva jednotlivých vozidel projíždějících křižovatkou. Je zřejmé, že při nadměrném zdržení vozidla v křižovatce zůstává motor většiny používaných vozidel běžet na volnoběžné otáčky, čímž spotřebovává pohonné hmoty, aniž by ujelo nějakou vzdálenost. Na každé správně řízené křižovatce se tímto způsobem dosáhne značné úspory pohonných hmot, protože křižovatkou za den projíždí v některých lokalitách až tisíce automobilů. Průměrné snížení prostojů v dané lokalitě o dvě až pět sekund představuje značnou úsporu pohonných hmot a zajišťuje do budoucna možnou kalkulaci návratnosti investice se zavedením světelného signalizačního zařízení na dané křižovatce.

Ze snížení průměrného prostoje plyne také neméně důležitý ekologický přínos v podobě nižších emisí a imisí, které se vyskytují v oblasti křižovatky a snížení hlukové zatíženosti, neboť snižujeme dobu trvání nejvyšší intenzity hluku na jednotlivých ramenech křižovatky. Dále se snižují psychologické nároky na řidiče, kteří nemusí věnovat zvýšenou míru pozornosti provozu v jiných pruzích v křižovatce a nemusí také činit náročná rozhodnutí, jak tomu je u neřízených křižovatek. Dalším a významným aspektem je zavedení liniové, nebo plošné koordinace plynulosti jednotlivých pohybů dopravních proudů na území města, nebo ve větších sídelních útvarech popřípadě lze zavádět centrální řízení v rozsáhlých částech města.

Hlavním problémem při návrhu řízení křižovatky je sestavení signálního plánu, který je programem řízení provozu na dané křižovatce. Z tohoto signálního plánu jsou zřejmé délky jednotlivých časových úseků pro světelné signály na jednotlivých návěstidlech v křižovatce. Tento dokument je pro řízení křižovatky klíčový a nelze se bez něj obejít. Návrh signálního plánu vychází ze zákona o provozu na pozemních a provozních specifik dané křižovatky s intenzitami vstupujících vozidel z jednotlivých směrů .

Ke světelnému řízení každé křižovatky tvoří základní předlohu pevný signální plán, který je nutno zhotovit i pro dynamický způsob řízení křižovatky. Příklad tohoto plánu je uveden na obrázku č.1.



= Červenožlutá

= Zelená

= Červená

= Žlutá

Obr.č.1: Příklad pevného signálního plánu : Křižovatka Praha 1 P2/60, UZP 27. s

Hlavní normou pro návrh signálního plánu pro řízení křižovatky pomocí světelného signalizačního zařízení jsou technické podmínky TP81. Z těchto podmínek je nutné upozornit na základní pojmy a vzorce, které se při návrhu signálního plánu používají. Jedná se o tyto pojmy:

Světelné signalizační zařízení

Soustava vzájemně závislých návěstidel s řídící, nebo ovládací jednotkou, používané k řízení silničního provozu. Skládá se zejména z řadiče, návěstidel a příslušenství (detektory, ruční řízení, tlačítko pro chodce apod.)

Fázová skupina (fáze)

Množina proudů, které mohou do křižovatky vstupovat současně

Kolize

Směrování dvou vozidel, nebo vozidla a chodce ve stejném čase do stejného místa tak, že bez provedení opatření by došlo k dopravní nehodě.

Kolizní proudy

Proudy, kterým hrozí nebezpečí kolize.

Nekolizní proudy

Proudy, kde nebezpečí kolize nevzniká.

Podmíněné kolizní proudy

Kolizní proudy, pro které platí pravidla o přednosti v jízdě dle vyhlášky o provozu na pozemních komunikacích.

Kolizní plocha

Je ta část plochy komunikace, kde se dráha vyklizujícího vozidla, nebo chodce střetává s dráhou najíždějícího vozidla, nebo chodce.

Vyklizovací dráha

Dráha vyklizujícího vozidla od stop čáry na konec kolizní plochy, nebo dráha vyklizujícího chodce od vstupu do vozovky za návěstidlem na konec kolizní plochy v metrech.

Vyklizující vozidlo

Poslední vozidlo z prvního kolizního proudu, jemuž je v době zelené umožněn vstup do křižovatky.

Najížděcí dráha

Dráha najíždějícího vozidla od stop čáry k začátku kolizní plochy, respektive dráha vstupujícího chodce od vstupu do vozovky za návěstidlem k začátku kolizní plochy v metrech.

Mezičas

Je časový interval, který musí uplynout mezi koncem doby zelené prvního z dvojice kolizních proudů a začátkem vstupu druhého z dvojice kolizních proudů. V této době musí poslední (vyklizující) vozidlo projíždějící v prvním kolizním proudu v končící době zelené bezpečně opustit kolizní plochu dříve, než první (najíždějící) vozidlo jedoucí v době zelené v druhém kolizním směru této kolizní plochy dosáhne.

Vyklizovací doba

Doba potřebná k projetí vyklizujícího vozidla od stop čáry na konec kolizní plochy, nebo doba potřebná k chůzi vyklizujícího chodce od vstupu do vozovky za návěstidlem do okamžiku dosažení začátku kolizní plochy.

Najížděcí doba

Doba potřebná k projetí najížděcího vozidla od stop čáry k začátku kolizní plochy, nebo doba potřebná k chůzi vstupujícího chodce od okamžiku vstupu do vozovky za návěstidlem k začátku kolizní plochy.

Bezpečnostní doba

Doba zohledňující vliv pojíždění signálu pozor v souladu s pravidly silničního provozu po skončení signálu volno.

Detekční smyčka

Technické zařízení zabudované ve vozovce sloužící k záznamu průjezdu vozidla.

Z důvodů častého výskytu pojmů, které nejsou uvedeny jako základní v TP 81 uvádím tyto pojmy k dalšímu prohloubení daného tématu.

Vstupní čas

Doba, kterou potřebuje v pořadí n-té vozidlo čekající v řadícím pruhu před křižovatkou k tomu, aby se ze své polohy v daném pořadí dostalo ke stop čáře.

Signální obraz

Je stav světelných polí na signální ploše.

Signální skupina

Je skupina návěstidel, na nichž probíhají změny shodných signálních obrazů ve stejný časový okamžik

Cyklus

Je doba, během které proběhne na jednom návěstidle celá sestava signálního obrazu.

Časová ztráta

Je čas v průběhu cyklu, který nemůže být využit pro vjíždění vozidel do křižovatky

Pojížděná žlutá doba

Doba části žlutého signálu, se kterou se při výpočtu počítá jako s dobou vjíždění posledního vozidla na daném vjezdu.

Signální plocha

Plocha návěstidla, na které se objevují světelné signály.

Technické podmínky uvádějí také základní vzorce, které jsou vhodné pro použití k návrhu signálního plánu. Tyto níže uvedené vzorce umožňují vypočítat hodnoty délky cyklů a mezičasů.

$$C = \sum t_z + \sum t_m \quad (1)$$

$$t_m = t_v - t_n + t_b \quad (2)$$

$$t_v = \frac{(L_v + l_{voz})}{V_v} \quad (3)$$

$$t_n = \frac{L_n}{V_n} \quad (4)$$

Technické podmínky TP 81 vysvětlují proměnné ve vzorcích takto:

c	délka cyklu [s]
t_z	nutná doba zelené fáze [s]
t_m	rozhodující (nejdelší) mezičas mezi fázemi následujícími po sobě [s]
t_v	vyklizovací doba [s]
t_n	najížděcí doba [s]
t_b	bezpečnostní doba [s]
L_v	vyklizovací dráha [m]
L_n	najížděcí dráha [m]
L_{voz} ...	délka vyklizujícího vozidla [m]
v_v	vyklizovací rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
v_n	najížděcí rychlost [$m \cdot s^{-1}$]

Technické podmínky TP81 uvádějí pro správnou orientaci v návrhu signálního plánu přibližné hodnoty pro délky cyklu. Tyto hodnoty jsou obsaženy v tabulce č.1.

Tabulka č.1.

Druh délky cyklu	Hodnota délky cyklu [s]
minimální	30
optimální	50 - 80
maximální	100 - 120

Rovněž tak pro výpočet mezičasů uvádí TP 81 standardizované hodnoty najížděcích a vyklizovacích rychlostí. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.2

Tabulka č.2.

Vyklizovací a najížděcí rychlosti		[kmh ⁻¹]	[ms ⁻¹]
motorová vozidla			
v přímém směru		35	9,7
v oblouku		25	7
tramvaje			
v přímém směru v obloucích o poloměru 60 m,nebo větším v úsecích bez kolejových konstrukcí		25	7
v obloucích o poloměru 25 až 60 m		20	5,6
v obloucích do poloměru 25 m		15	4,2
cyklisté		15	4,2
chodci		5	1,4
Délka vyklizujícího vozidla	lvoz [m]		
motorová vozidla	5		
tramvaje	15		
cyklisté	0		
chodci	0		
Bezpečnostní doba	tb [s]		
motorová vozidla	2		
tramvaje	0		
cyklisté	1		
chodci	0		

1.2. Vyšší formy řízení křižovatek

Základním typem řízení křižovatek je řízení pomocí pevného signálního plánu. Dnes je však tento systém ve velkých aglomeracích nahrazován dynamickým řízením, které signální plány upravuje podle aktuálního stavu provozu na křižovatce nebo před křižovatkou, např. obsazenosti jednotlivých řadících pruhů. Pro tento typ řízení je nezbytně nutné získávat průběžné údaje o těchto stále se měnících se charakteristikách pomocí detektorů různých druhů. Dynamické řízení probíhá v několika formách.

Časově závislé plány

Výměny pevně stanovených signálních plánů jsou realizovány časovým spínačem v předem stanovených okamžicích dne popřípadě týdne. Tyto změny jsou v nepřímé vazbě na aktuálním provozu, ale jsou v přímé vazbě na intenzity zjišťované předem a přiřazené určitému časovému období.

Dopravně závislé plány

Změny signálních plánů jsou řízeny programem on-line, mikroprocesorem v řadiči, nebo způsobem, kdy počítač v centrále zpracovává údaje o dopravních proudech, které byly získány pomocí detektorů instalovaných na všech vjezdech do křižovatky.

Dopravně částečně závislé plány

V tomto systému řízení křižovatky preferujeme stálou zelenou fázi hlavního směru, kterou přerušuje poptávka po zelené fázi ve vedlejších směrech, které jsou z pravidla relativně málo zatíženy. Změny jsou výsledkem sběru dat z vedlejších směrů pomocí detektorů.

Dopravně plně závislé plány

V tomto systému řízení se změny signálních plánů realizují přerozdělením zelených při zachování pořadí fází i délky cyklu vynecháním nepožadované fáze, nebo změnou pořadí fází a tvorbou signálního plánu v reálném čase, změnami délky cyklu, délek a pořadí fází

2 KOORDINACE ŘÍZENÍ KŘÍŽOVATEK

Koordinace křižovatek značně zvyšuje plynulost pohybů proudů vozidel v upřednostněných hlavních tazích městských komunikací a tím snižuje zdržení vozidel v koordinovaném hlavním směru. Tímto koordinace přispívá ke snížení spotřeby pohonných hmot, emisí spalin, snižuje hodnoty hluku a zvýšení homogenity dopravního proudu. Zvýšením homogenity dopravního proudu se totiž zvyšuje bezpečnost silničního provozu. Určitou nevýhodou je zvýšení časového zdržení pro příčný směr a větší citlivost na náhodné poruchy v proudech vozidel.

Koordinace světelného řízení může probíhat několika způsoby. V případě liniové koordinace jde o princip zelené vlny, Schnabelovu translační metodu a princip signálního trychtýře.

2.1 Princip zelené vlny

Při správné funkci zelené vlny jsou na jednotlivých koordinovaných křižovatkách nastaveny začátky zelených fází pro hlavní směr tak, že čelo prvního vozidla kolony vozidel, která projede první křižovatkou ve své zelené době, dojde za předpokladu jízdy celé kolony stálou tzv. koordinační rychlostí k příjezdu na následující křižovatku v době, kdy tam bude mít opět zelenou. V důsledku toho nedochází k dalšímu časovému zdržení této kolony. Předpokladem k zavedení zelené vlny je splnění provozních a stavebnětechnických požadavků. Nejvhodnější je dodržení koordinace v obou jízdních směrech tahů. Při velkých obtížích se lze spokojit jen s koordinací jednoho (zpravidla zatíženějšího) směru. Stavebnětechnické požadavky jsou návrhové prvky trasy umožňující dodržení koordinační rychlosti, dostatečný počet pruhů, vyloučení zúžených pruhů. Vzdálenost křižovatek má být maximálně 800 metrů a délka úseku, ve kterém má být koordinace prováděna, má být omezena tak, aby nedocházelo k rozpadu kolon. Provozní podmínky vyžadují stejnou dobu cyklů na všech křižovatkách, měřením ověřenou reálnost koordinační rychlosti, znalost časových variací intenzit a skladby dopravních proudů, znalost provozních údajů, znalosti o intenzitách pěších proudů a jejich časových variacích a průkaznost převahy intenzity proudů vozidel s průjezdem přes všechny koordinované křižovatky nad intenzitou proudů odbočujících.

Při zavádění koordinace křižovatek na bázi principu zelené vlny se uplatňuje tzv. progresivní rychlost.

2.1.1 Progresivní rychlost

Progresivní rychlost je veličina sloužící k návrhu pohybu kolony vozidel jedoucích v koordinovaných směrech. Progresivní rychlost V_p je účelné odvozovat od rychlosti čela kolony. Pro úspěšnou koordinaci platí následující vztah [1]:

$$0,85 * V \leq V_p \leq V \quad (5)$$

kde V je nejvyšší povolená rychlost v daném úseku.

Progresivní rychlost je nepřímo úměrná intenzitě provozu, kdy ve špičce je nižší a v sedle je vyšší. Při stanovení progresivní rychlosti je nutné brát v úvahu skladbu dopravního proudu v průběhu dne.

Při návrhu hodnoty progresivní rychlosti je dále třeba brát v úvahu, že těžká nákladní vozidla, velká stoupání, úzké jízdní pruhy, malé oblouky a špatná kvalita vozovky vedou ke snížení rychlosti jízdy. Pro vysokou intenzitu provozu nemůže být žádoucí progresivní rychlost prakticky dodržena. Ani použití nízké rychlosti nebývá úspěšné, protože ve skutečnosti není řidiči akceptována a dodržována.

2.1.2 Délka cyklu a vzdálenost dělicích bodů

Předpokladem pro koordinaci v zelené vlně na silničním tahu je stejná délka cyklu na všech koordinovaných křižovatkách. Krátkodobé odchylky od této doby je nutné před zavedením koordinace vyrovnat.

Krátké cykly mohou být při koordinaci navrhovány k řízení provozu na slabě zatížených komunikacích, které jsou napojeny na hlavní tahy, u světelného signalizačního zařízení pro chodce v koordinovaném tahu a u křižovatek se slabým příčným provozem.

Koordinace na bázi zelené vlny se navrhuje pomocí diagramu dráha – čas. V tomto zobrazení je pohyb kolony vozidel znázorněn šikmo probíhajícím svazkem, jehož omezující čáry jsou trajektoriemi prvního a posledního vozidla kolony. Koordinační rychlost odpovídá tangentě úhlu, který svírá osa svazku se svislou osou času. Délku cyklu, která musí být na všech křižovatkách stejná, je možno najít tak, že vyhledáme optimální cyklus pro každou křižovatku tahu a jako jednotný volíme nejdelší, nebo ten, který poskytuje nejmenší rezervu kapacity celé křižovatky dle níže uvedených vztahů [1].

$$RK_{kř} = \{(Y_{prak} - Y) / Y\} * 100 \quad (6)$$

kde:

$RK_{kř}$... rezerva křižovatky

Y ... součet stupňů saturace všech fází Y

Y_{prak} prakticky možná maximální hodnota Y

$$Y_{prak} = 0,9 \quad Y_{max} = 0,9 - 0,0075 L \quad (7)$$

kde:

L ... celkový ztrátový čas během cyklu (s)

$$Y_{max} = 1 - 0,00833 L.$$

Pro určení délky cyklu C a stanovení koordinační rychlosti kolem 50 kmh^{-1} lze určit polohy dělicích bodů to je průsečíků protisměrných koordinačních svazků podle rovnice:

$$v = \frac{(2l_m)}{(nC)} \quad (8)$$

kde:

l_m ... vzdálenost dělicích bodů

C ... použitá délka cyklu (s)

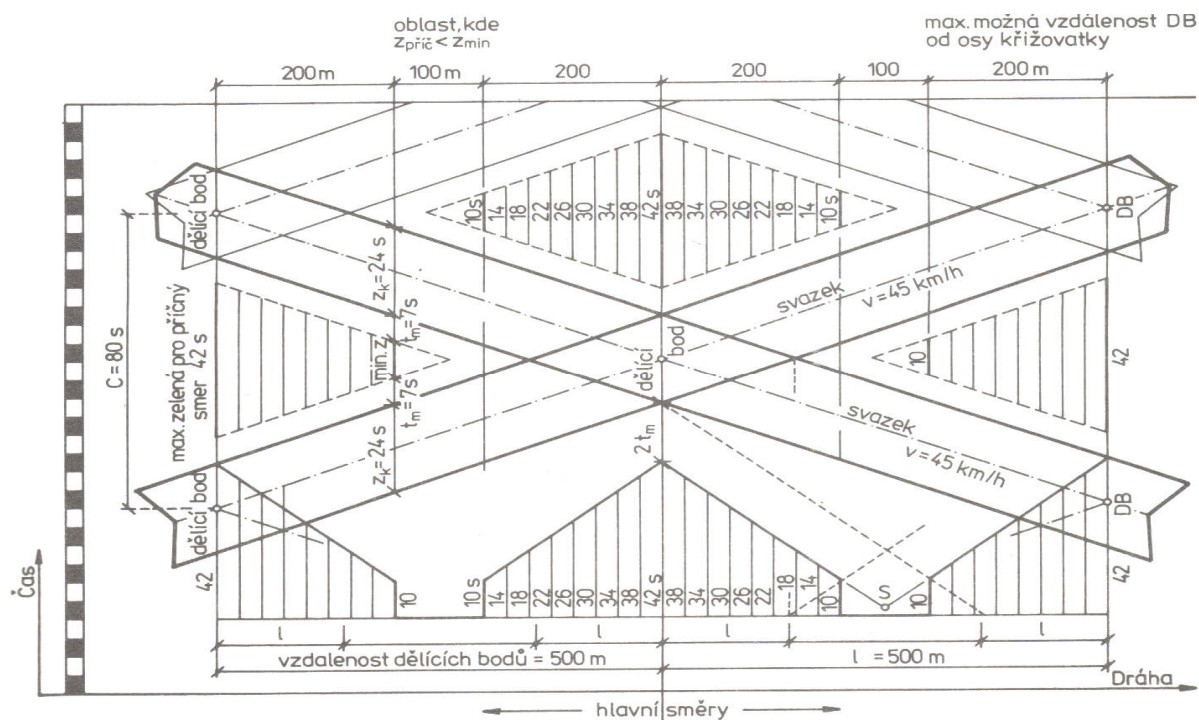
n ... přirozené celé číslo ($n = 1, 2, 3, \dots$)

V těchto bodech, nebo v jejich těsné blízkosti by měli být i středy koordinovaných křižovatek.

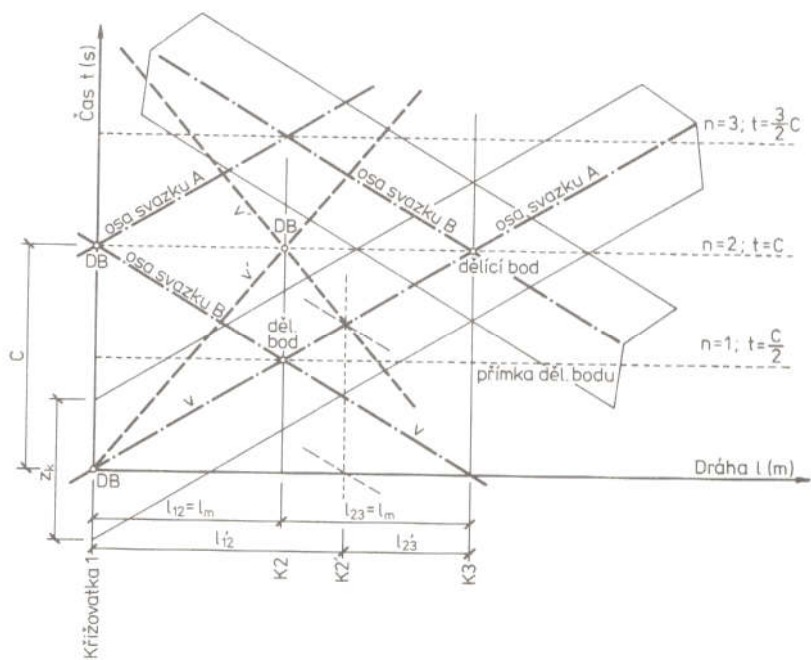
2.2 Schnabelova translační metoda

Leží-li křižovatky v místech dělicích bodů, jak je zřejmé z obr.č.2, je možno časové mezery mezi současnými průjezdy obou směrů koordinace křižovatkou využít k průjezdu vozidel v příčném směru. Kdyby ležela křižovatka v poloze $K2'$ (viz obr.č.2), nebyla by pro příčný směr k dispozici již žádná doba. Na obr.č.3 je znázorněna doba, která je k dispozici pro příčné proudy po odečtení potřebných mezičasů, a to ve tvaru kosočtverce. Ve směru časové osy jsou zde číselně označeny úsečky, které představují zelené doby pro příčný směr v různých polohách křižovatky na ose délek. Schnabelova translační metoda transformuje kosočtverec do podoby pětiúhelníku (tzv.stanu) tím, že bere v úvahu i minimálně možné zelené příčného směru.

Vyznačené skutečné vzdálenosti křižovatek s úsečkami ve směru časové osy (v délce odpovídajících vstupních časů příčného směru), vykreslené na posuvné průsvítce, posunováním po ose délek umožní najít takovou polohu křižovatek vůči dělicím bodům, kdy potřebný počet vozidel může dostat v příčném směru zelenou (úsečky vstupních časů zůstanou všechny uvnitř ploch stanu). Uvedená metoda může také prokázat neřešitelnost úkolu při zvolené délce cyklu, zelené době a koordinační rychlosti. Změnami těchto hodnot, popř.zaslepením některých podružných křižovatek, resp.změnami čísla n lze najít přijatelné řešení. V krajním případě se může koordinovat jen jeden směr zelené vlny a druhý se přizpůsobí potřebám převedení příčné dopravy. Při výraznějších počtech odbočujících vozidel z příčných komunikací je třeba prodloužit délky zelených tak, aby odbočující vozidla z příčných ulic mohla projet následnou křižovatkou buď před koordinovaným svazkem, nebo za ním.



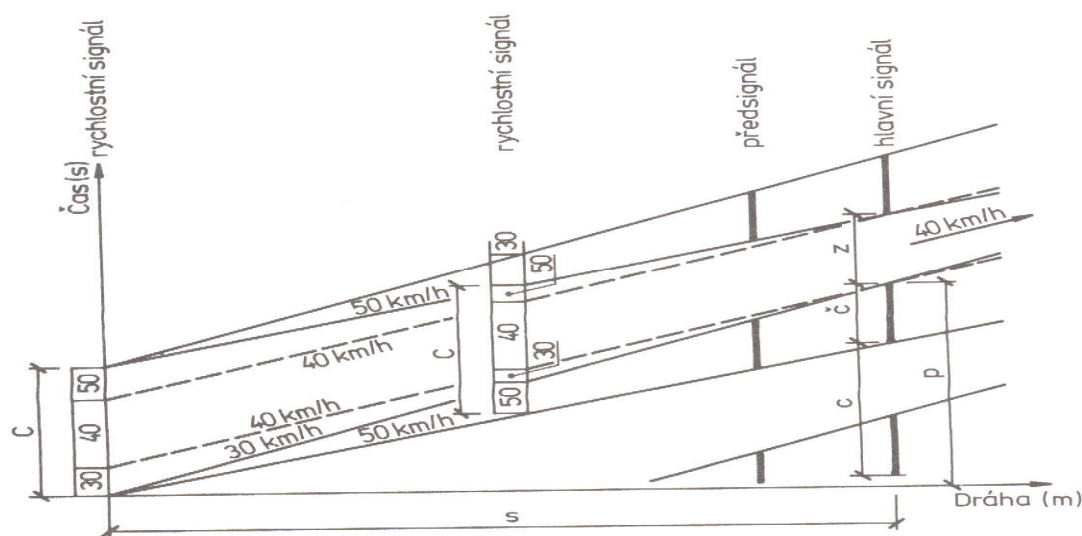
Obr.č. 2 Liniová koordinace, systém dráha – čas [1]



Obr.č.3 Návrh liniové koordinace dle Schnabela [1]

2.3 Signální trychtýř

Pro správnou funkci zelené vlny je třeba dodržet koordinační rychlost. V průběhu koordinovaného úseku, zpravidla za každou křižovatkou, se pro informaci řidičů používají rychlostní návěstidla. Před první křižovatkou zelené vlny je však vhodné náhodné rozdělení příjezdů vozidel i rychlostí uspořádat tak, aby se kolony vozidel vytvářely již v předstihu, usměrňovala se tak rychlost k hodnotě koordinační rychlosti, aby se již příjezd vozidel k první křižovatce kryl se začátkem zelené. K tomu slouží tzv. signální nebo rychlostní trychtýř zobrazený na obr.č.4. Začíná rychlostním návěstidlem, kde se střídají rychlosti 30,40 a 50 kmh⁻¹ (40 kmh⁻¹ je doporučená koordinační rychlost), a to za dobu cyklu zavedenou pro všechny křižovatky v koordinovaném tahu. Signál 40 trvá stejnou dobu, jako je doba zelené na první křižovatce.



Obr.č.4 Signální trychtýř [1]

Podle obr. č. 4 je fázový posun p začátku signálu 30 a začátku zelené první křižovatky roven [1]:

$$p = \frac{s}{v_{\min}} = \frac{s}{v_{\max}} + \check{c} \quad (s) \quad (9)$$

p ... fázový posun (s)

s ... vzdálenost rychlostního návěstidla od první křižovatky (m)

č ... doba červeného signálu na první křižovatce (s)

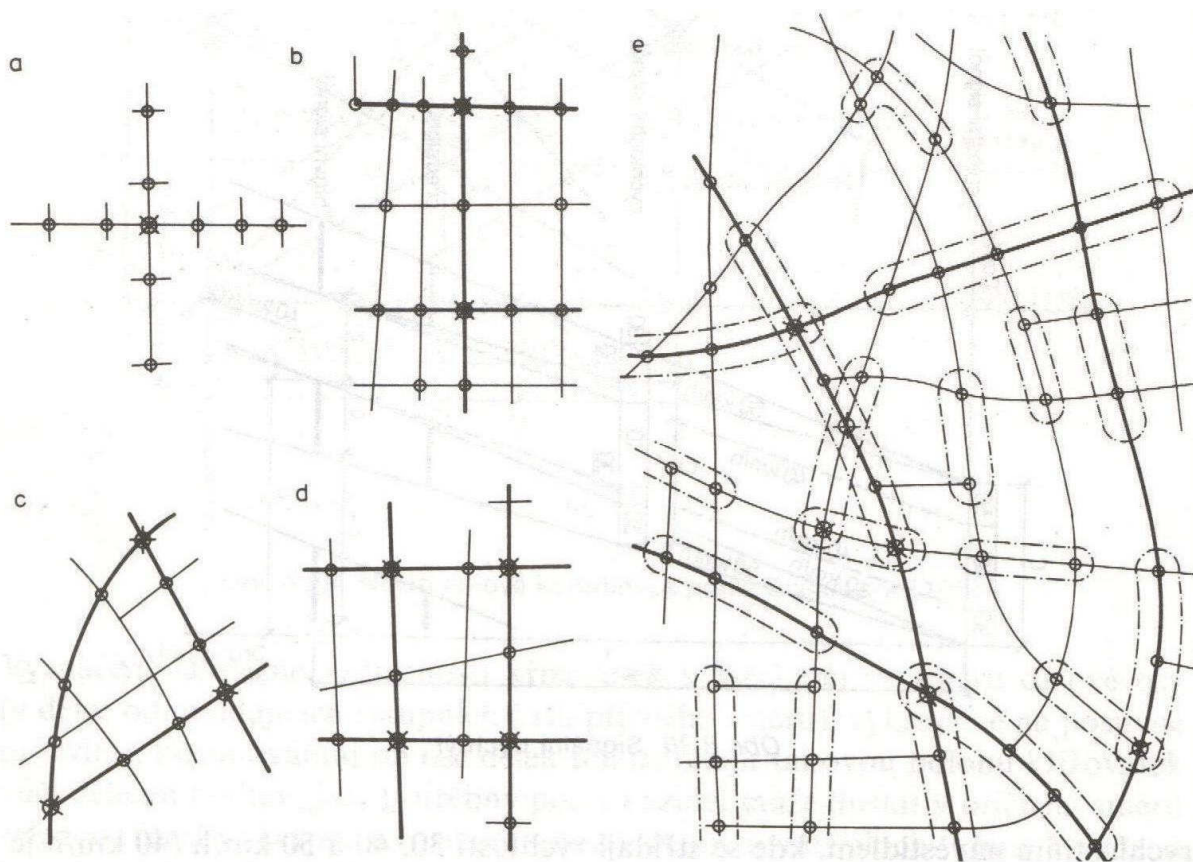
v_{\min} ..nejnižší rychlost použita na rychlostním návěstidle (m.s^{-1})

v_{\max} ..nejvyšší rychlost na rychlostním návěstidle (m.s^{-1})

2.4 Plošná koordinace

V určité oblasti města lze použít několika koordinovaných tahů. Pokud se tyto tahy vzájemně neprotínají, fungují jako samostatné zelené vlny. Mají li však některou křižovatku společnou (jedná se o základ plošné koordinace), je třeba na těchto společných křižovatkách najít optimální cyklus, který pak bude jednotný pro oba křižující se tahy. Plošná koordinace může probíhat v různých konfiguracích řízených křižovatek, možné případy jsou uvedeny na obr. č. 5.

Jak je z obr. č. 5 patrné, je jednou z možných konfigurací křižovatek také trojúhelníková konfigurace (případ c).



Obr.č.5 Příklady plošné koordinace [1]

2.4.1 Koordinace dvou křižujících se tahů se zelenou vlnou

Koordinace dvou křižujících se tahů se zelenou vlnou je nejjednodušší případ plošné koordinace. Optimální cyklus společné křižovatky je možno ověřit sumarizací zdržení všech vozidel na všech křižovatkách obou tahů pro sousední hodnoty k optimální délce cyklu, zjištěné na společné křižovatce. Vyjde-li výpočtem optimální cyklus společné křižovatky např. 83 s, provede se výpočet zdržení všech vozidel na všech křižovatkách pro délku cyklu 80 a 100s a použije se cyklus s nižším zdržením. Značné obtíže při výpočtu i provozu jsou vyvolány silnějšími proudy vozidel, která odbočují z jedné zelené vlny na druhou v místě společné křižovatky. Pokud systém tvoří jen zelené vlny, protínající se vždy jen v jednom bodě, je sice třeba zase zvolit jednotnou délku cyklu pro celý systém a ověřit ji celkovým zdržením, ale celkový návrh spočívá v principu na řešení jednotlivých zelených vln bez dalších vazeb.

2.4.2 Koordinace na komunikacích tvořících uzavřený obrazec

Nastane-li složitější vzájemné protínání koordinovaných tahů, přičemž se vytvářejí uzavřené obrazce (trojúhelník, nebo čtyřúhelník), je třeba dbát při návrhu ještě na další podmínku, vyjádřenou v níže uvedeném vztahu [1].

$$\sum_{x=1}^k Z_{xy} + \sum_{x=1}^k t_{m,xy,y+1} + \sum_{x=1}^k t_y = nC \quad (s) \quad (10)$$

x... je počet vrcholů uzavřeného obrazce křižovatek, v nichž se protínají zelené vlny (x = 1, 2,k)

y... počet stran obrazce

Z_{xy} .. zelená doba vjezdu do křižovatky x z vjezdu y (s)

$t_{m,xy+y+1}$...mezičas na křižovatce x mezi fázemi vjezdu z úseku y a z úseku y+1 (s)

t_ydoba jízdy po úseku y mezi křižovatkami x a x+1 (s)

C...jednotná délka cyklu v uzavřeném obrazci (s)

n....celé číslo

U třetího členu levé strany rovnice (10) se uvažuje znaménko plus, počítá-li se v uzavřeném obrazci s pohybem proudů vozidel ve stejném smyslu po okruhu, směřují-li pohyby do křižovatky proti sobě, uvažuje se znaménko záporné. Není-li levá strana rovnice celistvým násobkem délky cyklu, nemůže být jeden úsek koordinován. Je však možno upravit koordinační rychlosti a hodnoty t_y , nebo zvětšit délky zelených a mezičasů, tak aby byla rovnice splněna.

2.4.3 Vazby mezi skupinami koordinovaných křižovatek

Koordinace všech směrů zelených vln, protínajících se v uzavřených obrazcích, velmi složitá, někdy prakticky i nemožná. Zkušenosti shromážděné z provozu dvou větších oblastí koordinace v centru Londýna vyústily v doporučení koordinovat pouze menší skupiny křižovatek a koordinaci mezi nimi zajistit pomocí dynamického řízení křižovatek.

Obtíže početního zvládnutí plošné koordinace v centrech měst dopravně silně zatížených a obtíže vyplývající z neustále probíhajících časových variací intenzit vedly ke snaze využít k řízení počítače. Nezbytné je však průběžné získávání informací o intenzitách, o rychlostech a tvoření front pomocí detektorů. Údaje z detektorů se kumulují a zpravidla i přepracují v základním či skupinovém řadiči a kabelem, nebo rádiem se předávají do centrály. Tam jsou podle předem připravených programů zpracovány a proběhne rozhodovací proces, jímž se podle daných kritérií určí změny signálního plánu dané skupiny křižovatek. Rozhodnutí se předá zpět skupinovému řadiči, který příkázané změny signálního plánu provede. Tento proces probíhá v zadaných časových krocích tzn. tři až pět minut. Původní předpoklady uvažovaly až čtyři úrovně řízení: městská centrála, oblastní centrála, skupinový řadič a řadič křižovatky. Přitom i nejnižší stupeň má být schopen samostatně řídit provoz při poruše vyššího stupně. Rychlý vývoj mikroprocesorů vede ke změně počtu úrovní nebo náplně jejich činnosti. Oblastní či městské centrály se doplňují monitory televizního dohledu na křižovatkách zvláštního významu.

Účelem centrálního řízení je zajišťovat složitou plošnou koordinaci zelených vln v reálném čase za podmínky získávání průběžných údajů o dopravních proudech, s dodržáním optimalizačních kritérií a s vazbami na rychlé dispečerské řešení dalších problémů městské dopravy.

3 TEORETICKÁ VÝCHODISKA ŘEŠENÍ

V současné době se k navrhování signálních plánů izolovaných křižovatek, ale i soustav křižovatek používá metodika zveřejněná v Technických podmínkách TP81. Mimo tento způsob návrhu lze použít také metody v dnešní době méně využívané jako jsou například metody založené na Petriho sítích, simulační metody a v neposlední řadě metody lineárního programování.

Odborná literatura se velice často zmiňuje o síťové koordinaci signálních plánů světelně řízených křižovatek, bohužel informace o této problematice jsou často velmi strohé. Je to zejména proto, že zahrnutí všech náležitostí může způsobit neočekávané komplikace při výpočtu. Metody lineárního programování, však umožňují hledání úspěšného řešení. Studium odborné literatury nebylo zjištěno, že by se prostorovou koordinací světelně řízených křižovatek za pomoci metod lineárního programování někdo v minulosti zabýval. Patrně je to dáno tím, že metody LP jsou pro pracovníky zabývajícími se navrhováním signálních plánů metodami poměrně neznámými (např. i technické podmínky TP 81 se o nich nezmiňují).

V předložené diplomové práci bude problém koordinace řešen pomocí metod lineárního programování. Tato disciplína operační analýzy se zabývá tvorbou lineárních modelů a jejich řešením.

3.1 Lineární modely pro návrh signálního plánu

Lineární matematický model je z hlediska teorie rozhodování, matematicky zformulovaný zápis vztahů mezi veličinami rozhodujícími pro vyhledání optimálního řešení. Tento model má přesně definovanou strukturu, která musí být dodržena. Obecně se lineární model skládá ze dvou částí, kterými jsou soustava omezujících podmínek a účelová funkce. Soustava omezujících podmínek vymezuje množinu přípustných řešení. Pomocí této soustavy omezujících podmínek jsou při řešení zohledněna reálná omezení, která byla v zadání úlohy jasně definována a určeny definiční obory jednotlivých proměnných. Účelová funkce slouží v modelu ke zjištění hodnoty jednotlivého přípustného řešení. Hodnota účelové funkce dává řešiteli jednoznačnou informaci o kvalitě získaného řešení z pohledu cíle optimalizace. Pokud v úloze nastane případ, že máme

k dispozici více možných řešení, máme vypočítány hodnoty účelové funkce pro tato uvedená řešení a hodnota účelové funkce se maximalizuje, je z pohledu optimalizace kvalitnější to řešení, která má vyšší hodnotu účelové funkce, a naopak pokud se hodnota účelové funkce minimalizuje je považováno za lepší to řešení, které má menší hodnotou účelové funkce. Nastane - li případ, kdy mají řešení hodnotu účelové funkce stejnou, půjde z hlediska optimalizace (platí pro maximalizaci i pro minimalizaci) o dvě stejně kvalitní řešení.

Specifikem lineárních matematických modelů je, že se proměnné vyskytují v lineární formě a vztahy mezi nimi jsou aditivního charakteru. Proměnné je možno pouze sčítat, odečítat a násobit reálnou konstantou. Řešení lineárních modelů je nejpropracovanější částí matematického programování. Celá řada reálných problémů nemusí vykazovat lineární charakter, avšak řešení takovýchto problémů je možno často provádět při doplnění přídavných proměnných a doplňujících omezujících podmínek, které budou zajišťovat předpoklady stanovené pro lineární programování. Protože je nutné do modelu zadávat další proměnné a omezující podmínky, může rozsah modelu značně narůstat.

Lineární matematické modely pro řízení provozu na křižovatkách byly sestaveny ve Výzkumném ústavu dopravním v Žilině. Tyto lineární modely byly sestaveny pro optimalizaci dvou veličin, a to pro minimální poměrnou rezervu mezi časem, v němž umožňujeme vstup proudu do křižovatky v daném cyklu a dobou, která je v daném cyklu pro vstup tohoto proudu požadována, která se maximalizuje a délku cyklu, která se minimalizuje.

Před samotným sestavením matematického modelu pro návrh signálního plánu řízení křižovatek pomocí světelného signalizačního zařízení musí proběhnout tři přípravné kroky. Jedná se o výběr a stanovení pořadí fází, sestavu vstupních dat a volbu vhodného optimalizačního kritéria.

3.1.1 Výběr a stanovení pořadí fází

V případě přípravného kroku týkajícího se výběru a stanovení pořadí fází je nutné provést:

1. Sestavení grafu bezkoliznosti kde je výsledkem množina fází
2. Výběr minimálního počtu fází

3. Určení pořadí vstupů jednotlivých fází do křižovatky

Ad 1 – Sestavení grafu bezkoliznosti

V tomto přípravném kroku pro návrh signálního plánu musí být znám seznam vstupujících proudů do křižovatky také jejich rozdělení do určitých skupin. Skupiny proudů, které vstupují do křižovatky ve stejném okamžiku, jsou v odborné literatuře označovány jako fáze, nebo fázové skupiny. V dalším textu bude používáno označení fáze.

Je žádoucí, aby v každé fázi vstupoval do křižovatky co největší počet proudů a to z důvodů, aby počet fází nebyl příliš velký a aby každý proud v rámci cyklu využil maximálně dobu, po kterou je mu umožněn vstup do křižovatky

K vytvoření fází se používá metoda založená na teorii grafů. V této metodě se proudy vstupující do křižovatky nahradí vrcholy v grafu. Pokud existuje mezi vrcholy nekolizní, nebo podmíněně kolizní vztah jsou tyto vrcholy spojeny hranou. (podmíněně kolizním vztahem je míněno dodržení podmínek platné legislativy pro vjezd do křižovatky). Nekolizním vztahem proudů ve smyslu přímého střetu se rozumí takový vztah, kdy mezi jednotlivými proudy neexistuje žádný bod střetu (kolizní bod). V opačném případě zůstanou dané vrcholy hranou nespojeny. V sestaveném grafu bezkoliznosti se vyhledají maximální úplné podgrafy. Postup při určování maximálního podgrafu probíhá následovně: zvolí se libovolná dvojice vrcholů, které jsou spojeny hranou (tj. dvojice nekolizních proudů). Dále se k dané dvojici přidávají další vrcholy k této dvojici nekolizní. Pokud zůstává podgraf po přidání dalšího vrcholu úplný (každé dva vrcholy v podgrafu jsou spojeny hranou), je ve skutečnosti umožněno všem proudům vstupovat do křižovatky současně. Pokud se po přidání dalšího vrcholu naruší úplnost grafu (není splněna podmínka, že každé dva vrcholy jsou spojeny hranou), je proud reprezentovaný naposledy přidaným vrcholem kolizní s některým vrcholem v dané fázi.

Ad 2 – Výběr minimálního počtu fází

Množina fází sestavená podle prvního přípravného kroku i přes uplatnění zásady zařazování maximálního počtu proudů do fází může obsahovat velký počet prvků (fází). Vstup všech fází v signálním plánu, při jejich velkém počtu se může projevit z časového hlediska značnou délkou cyklu, tak i z hlediska optimalizace a tvorby modelu ve značném počtu

proměnných v modelu. Proto při řešení daného problému sledujeme záměr, aby konečný počet fází vybraných do fázového schématu byl minimální. V tomto přípravném kroku z množiny fází získané v předešlém přípravném kroku vybere minimální počet fází. Při tomto výběru je nutné dodržet podmínku, aby každý proud byl obsažen alespoň v jedné fázi. Pro výběr minimálního počtu fází může autor použít intuitivní řešení dle vlastních zkušeností, nebo použít další lineární matematický model, který byl pro tyto potřeby sestaven. Pro úplnost diplomové práce je dále uveden popis daného modelu.

Vstupními hodnotami do matematického modelu jsou: množina proudů a tzv. proudově fázová incidenční matice, jejíž použití však není nezbytně nutné. Proudově-fázová incidenční matice umožňuje jednodušší zápis soustavy omezujících podmínek do textu programu, který umožní model řešit. Zavedením této matice do modelu se nezvyšuje počet proměnných ani počet podmínek.

Proměnné vystupující v tomto matematickém modelu jsou použity k modelování výběru fází do výsledného fázového schématu. Definiční obory těchto proměnných jsou tvořeny hodnotami 0 a 1. Nabude-li proměnná po ukončení výpočtu hodnoty 1 bude fáze do výsledného fázového schématu vybrána. Nabude-li proměnná hodnoty 0 do výsledného schématu vybrána nebude.

Účelová funkce v tomto modelu vyjadřuje počet vybraných fází a cílem optimalizace je tuto hodnotu minimalizovat.

Soustava omezujících podmínek musí zajistit, aby každý proud vstupoval do křižovatky alespoň v jedné vybrané fázi a obsahovat obligatorní podmínky.

Obecný matematický model pro řešení úlohy o výběru minimálního počtu fází má tvar:

$$\min f(w) = \sum_{j \in J} w_j \quad (11)$$

za podmínek:

$$\sum_{j \in J} a_{i,j} w_j \geq 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (12)$$

$$w_j \in \{0,1\} \quad \text{pro } j \in J \quad (13)$$

kde:

I ... množina proudů

J ... množina fází

w_j ..proměnná modelující rozhodnutí, zda bude či nebude fáze j zahrnuta do výsledného fázového schématu

$a_{i,j}$..prvek proudově fázové matice,který modeluje skutečnost, zda proud i je ($a_{i,j} = 1$) či není ($a_{i,j} = 0$) zařazen ve fázi j .

Výraz (11) reprezentuje účelovou funkci.Omezující podmínky (12) jejichž počet odpovídá počtu proudů zajistí , že každému proudu bude umožněn vstup do křižovatky alespoň v jedné vybrané fázi.Omezující podmínky (13), jejichž počet odpovídá počtu fází, udávají definiční obory jednotlivých proměnných.

Dalším krokem v postupu je zjištění v jakém pořadí budou jednotlivé fáze po sobě následovat při vstupu do křižovatky. Protože je v matematickém modelu každému proudu j vstupujícímu do křižovatky i přidělena pouze jedna proměnná modelující začátek doby zelené $z_{i,j}$ a konec doby zelené $k_{i,j}$ musí fáze obsahující stejný proud být řazeny za sebou.

Při určení optimálního pořadí fází se postupuje takto. Při respektování požadavku mít fáze obsahující stejný proud řazeny za sebou se sestaví možná pořadí fází.V rámci těchto jednotlivých pořadí fází se z původní matice mezičasů vytvoří pro každou dvojici fází jdoucích po sobě dílčí tabulky mezičasů.V těchto dílčích tabulkách se vyhledá maximální mezičas,který je rozhodující pro další výpočet a pro jednotlivá pořadí fází se provedou součty maximálních mezičasů. Jako nejvýhodnější pořadí fází je vybráno pořadí, u kterého je součet maximálních mezičasů nejmenší. Pokud existuje více minimálních součtů a je-li součet rozhodujících mezičasů jediným kritériem optimality pořadí fází, potom je možno volit libovolné pořadí fází vyznačující se minimálním součtem maximálních mezičasů.

V případě koordinace křižovatek nemusí platit,že nejvhodnější pořadí fází vybraná pro dané křižovatky jsou nejvýhodnější z pohledu koordinace. V takovém případě je rozhodnutí na provozovateli,které kritérium při sestavení pořadí fází zvolí.V této diplomové práci bude preferováno v podobném případě kritérium koordinace.

Pokud není možné uspořádat fáze tak, aby pro každý proud vstupující ve více fázích bylo splněno, že tyto fáze budou řazeny za sebou a situace se nedá řešit ani výměnou dosud nevybrané fáze za fázi vybranou, je nutno u proudů zařazených ve fázích,které nejdou za sebou ,pro potřeby modelování omezit počet vstupů vyřazením proudu z některé fáze.

3.1.2 Příprava vstupních dat

Ke vstupním údajům vyžadovaným matematickým modelem patří intenzity účastníků silničního provozu vstupujících do křižovatky v jednotlivých proudech, doby potřebné pro vstup těchto účastníků do křižovatky a minimální doby zelené (zejména, vyskytují-li se proudy s nízkou intenzitou).

Intenzity vstupujících vozidel do křižovatky jsou zjišťovány na základě dopravních průzkumů. Pro použití v matematických modelech je potřeba zjištěné intenzity jednotlivých druhů motorových vozidel přepočítat na jednotková vozidla za daný čas. Metodiku pro zpracování dopravního průzkumu uvádí Ministerstvo dopravy ČR nebo specializované publikace [1], [2]. Není však vyloučeno provádět speciální dopravní průzkum vztažený na konkrétní hodnoty a čas jeho provádění (např. pro významné dopravní špičky).

Každý účastník silničního provozu spotřebuje při vstupu do křižovatky určitý čas z doby cyklu. V odborné literatuře [4] je tento čas přímo stanoven pouze pro proudy silničních vozidel. Je stanoveno, že každé silniční vozidlo potřebuje pro vstup do křižovatky dobu minimálně 2 s. Konkrétní hodnota vždy závisí např. na směrových a sklonových poměrech na jednotlivých ramenech křižovatky a dalších specifikách vyplývajících ze stavebního uspořádání křižovatky apod..

Proud vstupující do řešených křižovatek má rozdílnou intenzitou. U proudů s nízkou, nebo dokonce zanedbatelnou intenzitou by mohlo, za určitých okolností, dojít k tomu, že pro vstup do křižovatky by za účelem minimální nebo maximální hodnoty optimalizované veličiny byla pro uvedené proudy s nízkými intenzitami vyčleněna velice krátká doba. V krajním případě by mohlo dojít k tomu, že by tato doba klesla pod 2 s, která je považována za minimální dobu potřebnou pro vjezd vozidla do křižovatky, resp. pod reakční dobu účastníka silničního provozu. Z uvedeného důvodu je při návrhu světelného signalizačního zařízení vyžadováno, aby pro každý proud vstupující do křižovatky byla určena minimální doba, po kterou je mu umožněn vstup do křižovatky. Dle platných technických podmínek je tato minimální doba zelené stanovena na 5 s pro všechny druhy proudů vstupujících do křižovatky.

3.1.3 Optimalizační kritéria

V základních variantách modelů se vyskytují dvě optimalizační kritéria – minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou délkou doby zelené pro proud a délka cyklu. Maximalizace minimální poměrné rezervy **u** probíhá při zvolené délce cyklu, minimalizace délky cyklu **c** probíhá při zvolené hodnotě minimální poměrné rezervy. Navržené modely jsou však natolik univerzální, že umožňují zvolit a následně optimalizovat v podstatě libovolné kritérium.

3.1.4 Matematický model

Po realizaci přípravných kroků je možno přistoupit k tvorbě vlastního matematického modelu, jehož řešením budou získány časy začátků a konců dob zelených pro jednotlivé proudy, tj. údaje potřebné k sestavení signálních plánů. Matematický model byl v obecné formě publikován např. (Základy MTD), v této formě je však určen pouze pro návrh signálního plánu izolované křižovatky. Je tedy nutno jej přetransformovat do podoby umožňující plošnou koordinaci. Protože však model v obecné formě neumožňuje zapracování koordinačních podmínek, nebude v této části práce uveden. Matematický model bude uveden až v konkrétním tvaru v kapitole 4 v souvislosti s návrhem signálního plánu pro trojúhelníkovou koordinaci světelného řízení na křižovatkách.

4 VÝPOČETNÍ EXPERIMENTY SE SESTAVENÝMI MODELÝ

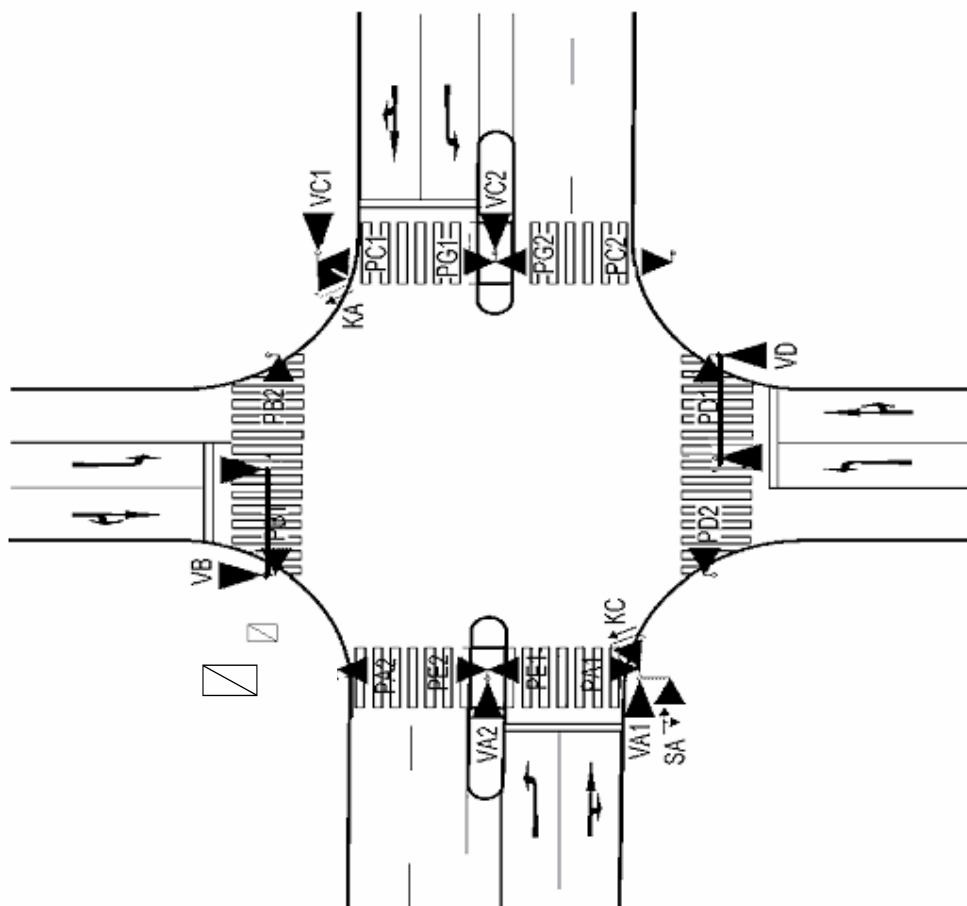
Pro verifikaci v praxi navrženého postupu nebyla nalezena vhodná konkrétní lokalita, proto bude problematika řešena pomocí modelové křižovatky navržené podle zásad stanovených v Technických podmínkách TP 81 a ČSN 736021 [4] [5].

V této kapitole bude pozornost zaměřena na sestavení modelu pro daný systém koordinace, jeho zápis do příslušného řešícího programu a realizaci výpočetních experimentů.

4.1 Charakteristika řešené lokality

Všechny křižovatky budou mít stejné stavební uspořádání – budou čtyřramenné a úrovně. Do každé řízené křižovatky bude vstupovat osm proudů. Organizace proudů na všech ramenech řízených křižovatek bude taktéž stejná, tzn. pro vozidla vstupující na každém rameni budou vyčleněny dva jízdní pruhy, pravý jízdní pruh z pohledu vstupu do křižovatky bude určen pro přímý směr jízdy a pro odbočení doprava. Levý jízdní pruh z pohledu vstupu vozidel do křižovatky bude určen k odbočení doleva. Pro proudy projíždějící křižovatkou přímo, a odbočující vpravo bude určeno hlavní světelné návěstidlo, které je umístěno na pravém okraji vozovky. Pro proudy odbočující vlevo je návěstidlo umístěno na dělicím ostrůvku na přechodu pro chodce a nebo nad příslušným pruhem.

Podrobnější informace týkající se stavebního uspořádání, rozmístění návěstidel a dopravně-inženýrské charakteristiky je možno vyčíst ze schématu křižovatky uvedeného na obr.č.5



Obr.č.5 Situační schéma řešené křižovatky

Legenda k obr.č. 5 :

- ▼ návěstidlo pro chodce
- ▶ návěstidlo pro vozidla
- O sloup světelné signalizace
- ◀▶ dělicí ostrůvek s opakovacím návěstidlem SSZ
- ◻ řadič

K praktickým experimentům byla zvolena modelová síť komunikací s křižovatkami uspořádanými do trojúhelníku.

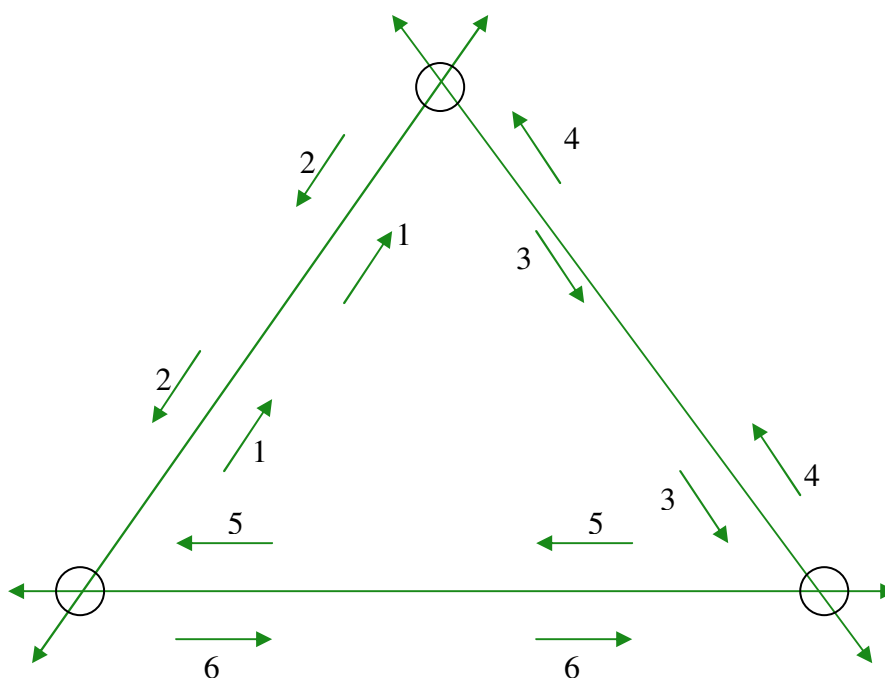
Prvním úkolem při koordinaci signálních plánů je stanovit, jaké proudy mají být v soustavě křižovatek koordinovány. Skutečnost, jaké proudy ke koordinaci zvolit, vyplývá z předpokládané jízdy vozidel, resp. z předpokládaných směrů průjezdů vozidel soustavou křižovatek a dále intenzit dopravních proudů v jednotlivých směrech. Pro potřeby koordinace se předpokládá, že nejzatíženější dopravní proudy budou proudy 1,2,3,4,5,6 vyznačené v obr 7, konkrétně jsou budou směry A15, A16, A17, A18, B23, B24 , B25 , B26 a směry C31, C32, C33, C34.

Koordinovaný směr



Křižovatka č.1

K1



K2

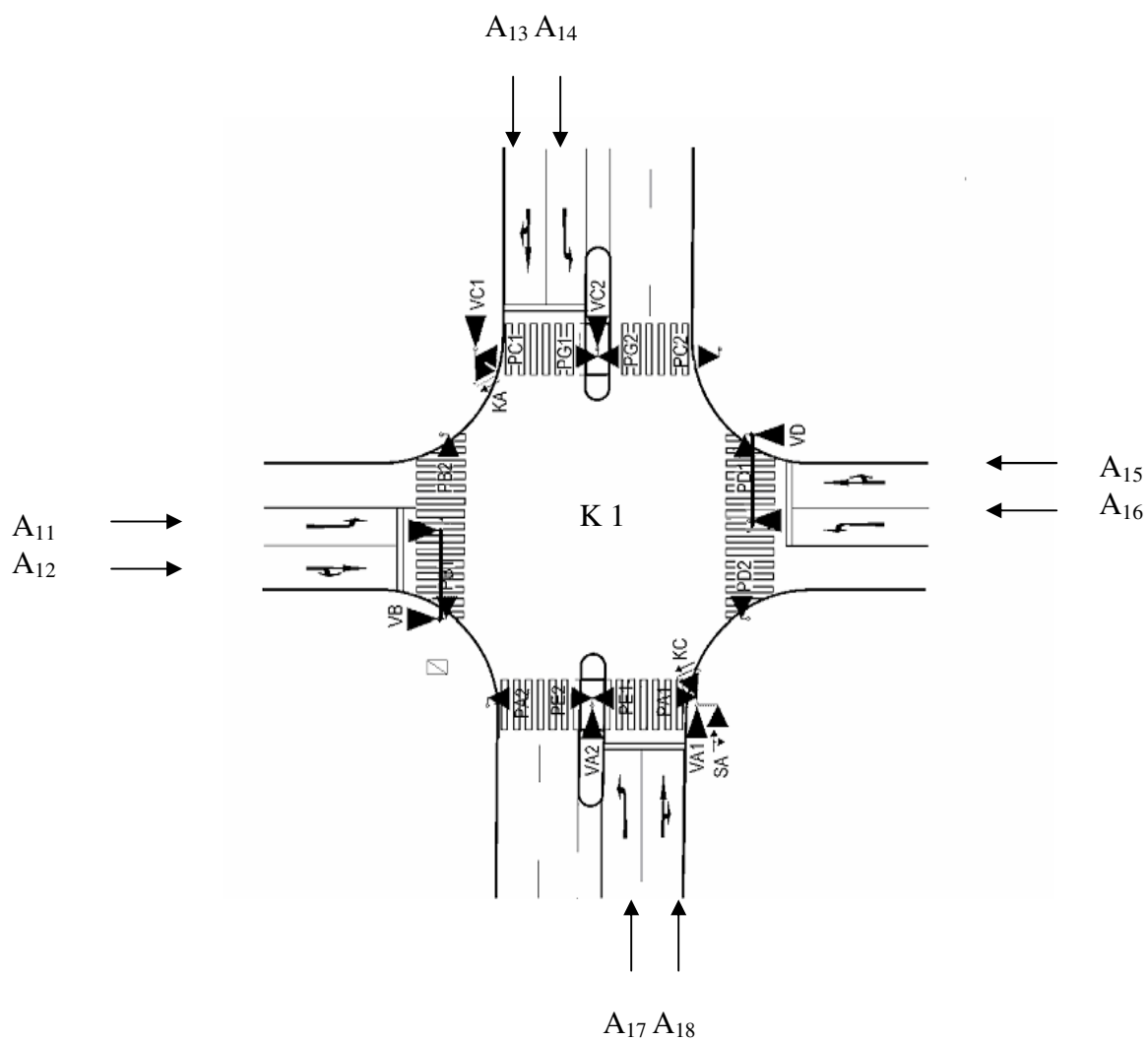
Obr.č. 6 Schéma konfigurace koordinovaných křižovatek

K3

Křižovatka č.2

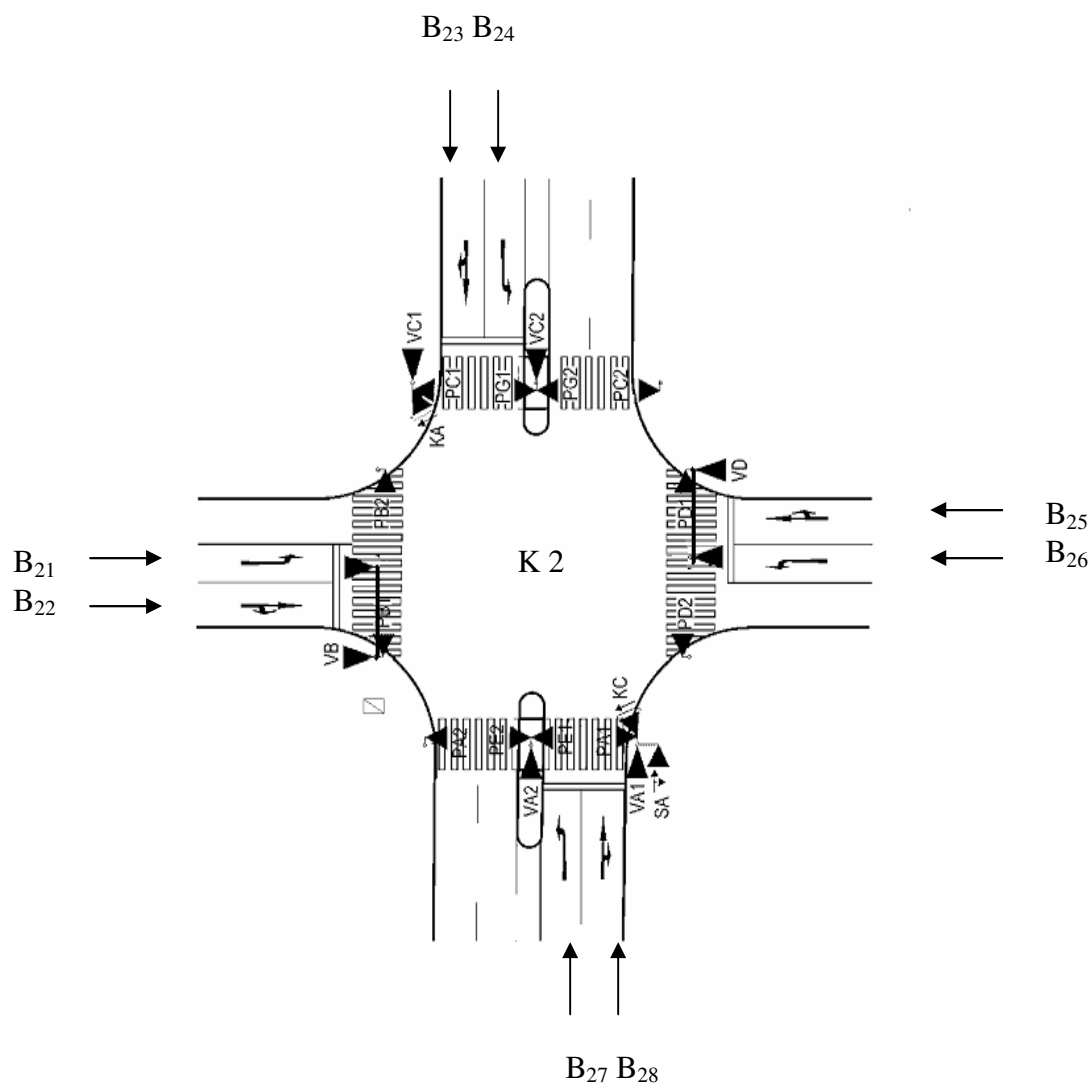
Křižovatka č.3

Do křižovatky K1 vstupují nekoordinované vstupní proudy A_{11} , A_{12} , A_{13} , A_{14} dále pak koordinované směry A_{15} , A_{16} , A_{17} , A_{18} . Podrobné uspořádání vstupních směrů je uvedeno na obr. č. 8.



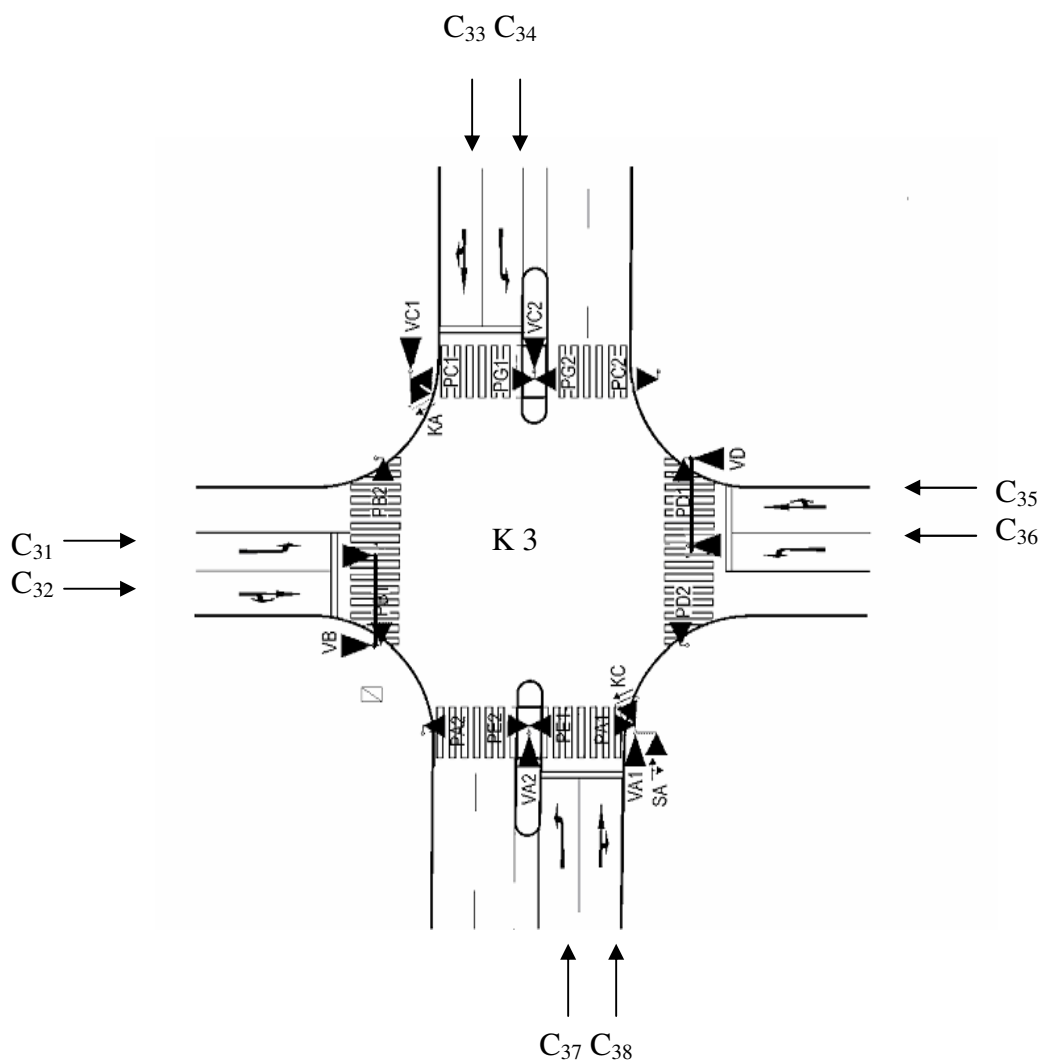
Obr.č. 7 Proudý vstupující do křižovatky K1

Do křižovatky K2 vstupují nekoordinované směry B_{21} , B_{22} , B_{27} , B_{28} dále pak koordinované směry B_{23} , B_{24} , B_{25} , B_{26} podrobné uspořádání vjíždějících směrů je zřejmé z obr.č. 8



Obr.č.8 Proudny vstupující do křižovatky K2

Do křižovatky K3 vstupují nekoordinované směry C35, C36 , C37, C38 dále pak koordinované směry C31, C32 , C33 , C34 podrobné uspořádání vjíždějících směrů je zřejmé z obr.č.9.



Obr.č.9 Proudý vstupující do křižovatky K3

Jak již bylo uvedeno výše v textu, návrh světelného řízení bude proveden pomocí lineárních modelů, které byly sestaveny pro optimalizaci dvou veličin, a to pro minimální poměrnou rezervu mezi časem, v němž umožňujeme vstup proudu do křižovatky v daném cyklu a dobou, která je v daném cyklu pro vstup tohoto proudu požadována, která se maximalizuje a délku cyklu, která se minimalizuje.

Matematický model, ve kterém se při známé délce cyklu c bude maximalizovat hodnota minimální poměrné rezervy u , upravený do podoby umožňující koordinaci křižovatek podle schématu uvedeného na obr. č. 7 má tvar:

$$\max f(u) = u \quad (14)$$

$$y_{ki} - x_{ki} \geq t_{ki} \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (15)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$y_{ki} - x_{ki} \geq \frac{\tau_{ki} \cdot q_{ki} \cdot c}{3600} u \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (16)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$x_{kj} - y_{ki} \geq m_{kij} \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (17)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$x_{kj} - y_{ki} \geq m_{kij} - c \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (18)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$y_{ki} \leq c \quad \text{pro } k = 1,2,3 \quad (19)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$x_{ki} \geq 0 \quad \text{pro } k = 1,2,3 \quad (20)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$y_{ki} \geq 0 \quad \text{pro } k = 1,2,3 \quad (21)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$u \geq 0 \quad (22)$$

Aby bylo možno zajistit koordinaci světelného řízení, musí být v modelu zahrnuty podmínky, které vytvářejí vazby mezi začátky a konci dob zelených na sousedních křižovatkách dotčených koordinovanými směry. Pro potřeby plošné koordinace křižovatek uvedených na obr. č. 6 budou mít podmínky tvary:

nejdříve podmínky pro začátky dob zelených:

$$x_{11} + Q_{11} \leq x_{21} + T_1 \quad (23)$$

$$x_{21} + Q_{21} \leq x_{12} + T_1 \quad (24)$$

$$x_{33} + Q_{33} \leq x_{13} + T_3 \quad (25)$$

$$x_{14} + Q_{14} \leq x_{34} + T_3 \quad (26)$$

$$x_{25} + Q_{25} \leq x_{35} + T_2 \quad (27)$$

$$x_{36} + Q_{36} \leq x_{26} + T_2 \quad (28)$$

podmínky pro konce dob zelené

$$y_{11} \geq y_{21} + T_1 \quad (29)$$

$$y_{22} \geq y_{12} + T_1 \quad (30)$$

$$y_{33} \geq y_{13} + T_3 \quad (31)$$

$$y_{14} \geq y_{34} + T_3 \quad (32)$$

$$y_{25} \geq y_{35} + T_2 \quad (33)$$

$$y_{36} \geq y_{26} + T_2 \quad (34)$$

Výraz (11) představuje účelovou funkci tj. minimální poměrnou rezervu mezi nabízenou dobou zelené a průměrně požadovanou dobou zelené pro příslušný proud, jejíž hodnota se maximalizuje.

Omezující podmínky (15) zajistí, aby pro každý proud nebyla nabídnuta doba zelené menší, než je minimální doba zelené, omezující podmínky (16) zajistí, aby pro každý proud byla nabídnuta doba zelené při respektování dosažené minimální poměrné rezervy, to znamená, že když bude např. poměrná rezerva nabývat hodnot $u = 0,3$, bude to znamenat pro každý proud nabídnutou minimální třicetiprocentní dobu zelené, která je za uvedený cyklus průměrně požadována. Pokud se uvedená hodnota bude rovnat jedné bude to znamenat, že pro každý proud v průběhu cyklu nabídneme takovou dobu zelené, která je v průběhu cyklu průměrně požadována.

Omezující podmínky (17) zajišťují, aby pro každou dvojici kolizních proudů zůstal v průběhu cyklu zachován mezičas minimálně v předepsané výši. Počet podmínek se rovná celkovému počtu dvojic kolizních proudů při přechodech mezi fázemi v cyklu pokud se přechody uskuteční.

Omezující podmínky (18) zajistí, aby pro každou dvojici kolizních proudů při přechodu mezi fázemi, který odpovídá hranici mezi cykly, byl zachován mezičas minimálně v předepsané výši. Počet těchto podmínek bude roven minimálně počtu dvojic kolizních proudů při přechodu mezi fázemi, který odpovídá hranici cyklu.

Omezující podmínky (19) zajišťují, aby konec doby zelené pro každý proud nepřekročil hranici cyklu. Počet omezujících podmínek se bude rovnat součinu počtu proudů a počtu křižovatek v řešené soustavě.

Omezující podmínky (20) vymezují definiční obor proměnných tj. začátků vstupů jednotlivých proudů do řešených křižovatek. Počet omezujících podmínek se bude rovnat součinu počtu proudů a počtu křižovatek v řešené soustavě.

Omezující podmínky (21) vymezují definiční obor proměnných tj. konců vstupů jednotlivých proudů do dané soustavy řešených křižovatek. Počet omezujících podmínek se bude rovnat součinu počtu proudů a počtu křižovatek v řešené soustavě.

Omezující podmínky (22) vymezují definiční obor proměnné - minimální poměrné rezervy.

Pokud chceme zajistit bezproblémové vstupy účastníků silničního provozu do křižovatek musí proměnná u dosahovat po optimalizaci minimálně hodnoty 1. Pokud by tato podmínka nebyla splněna došlo by ve výpočtu k nepřipustnému řešení, protože bychom nevytvořili pro proud v cyklu dostatečný časový prostor.

Podmínky (23)-(28) zajišťují plynulý vjezd prvního vozidla koordinovaného proudu do následující křižovatky. Podmínky (29)-(32) zajišťují plynulý vjezd posledního vozidla koordinovaného proudu do následující křižovatky. Počet takto stanovených podmínek je roven dvojnásobku počtu koordinovaných proudů. Veličiny označené symbolem Q v podmínkách (23)-(28) reprezentují doby potřebné pro vyklizení prostorů před křižovatkami před příjezdem vozidel v koordinovaných směrech. V podmínkách modelové sítě, ve které jsou prováděny výpočetní experimenty, je uvažováno s nulovými hodnotami, v reálných sítích však uvedené hodnoty budou určitě kladné.

Obecný matematický model, ve kterém se minimalizuje hodnota délky cyklu c , při vytvoření alespoň minimální doby zelené pro jednotlivé proudy, upravený do podoby umožňující koordinaci má tvar:

$$\max f(c) = c$$

$$y_{ki} - x_{ki} \geq t_{ki} \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (35)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$y_{ki} - x_{ki} \geq \frac{\tau_{ki} \cdot q_{ki} \cdot c}{3600} n \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (36)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$x_{kj} - y_{ki} \geq m_{kij} \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (37)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$x_{kj} - y_{ki} \geq m_{kij} - c \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (38)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$y_{ki} \leq c \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (39)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$x_{ki} \geq 0 \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (40)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$y_{ki} \geq 0 \quad \text{pro: } k = 1,2,3 \quad (41)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$c \geq 0 \quad (42)$$

podmínky pro začátky dob zelené

$$x_{11} + Q_{11} \leq x_{21} + T_1 \quad (43)$$

$$x_{21} + Q_{21} \leq x_{12} + T_1 \quad (44)$$

$$x_{33} + Q_{33} \leq x_{13} + T_3 \quad (45)$$

$$x_{14} + Q_{14} \leq x_{34} + T_3 \quad (46)$$

$$x_{25} + Q_{25} \leq x_{35} + T_2 \quad (47)$$

$$x_{36} + Q_{36} \leq x_{26} + T_2 \quad (48)$$

podmínky pro konce dob zelené

$$y_{11} \geq y_{21} + T_1 \quad (49)$$

$$y_{22} \geq y_{12} + T_1 \quad (50)$$

$$y_{33} \geq y_{13} + T_3 \quad (51)$$

$$y_{14} \geq y_{34} + T_3 \quad (52)$$

$$y_{25} \geq y_{35} + T_2 \quad (53)$$

$$y_{36} \geq y_{26} + T_2 \quad (54)$$

Struktura modelu a význam omezujících podmínek zůstává stejný jako v předcházejícím modelu ke změně došlo pouze u jedné obligatorní podmínky , kde namísto proměnné u vystupuje proměnná c a v účelové funkci.

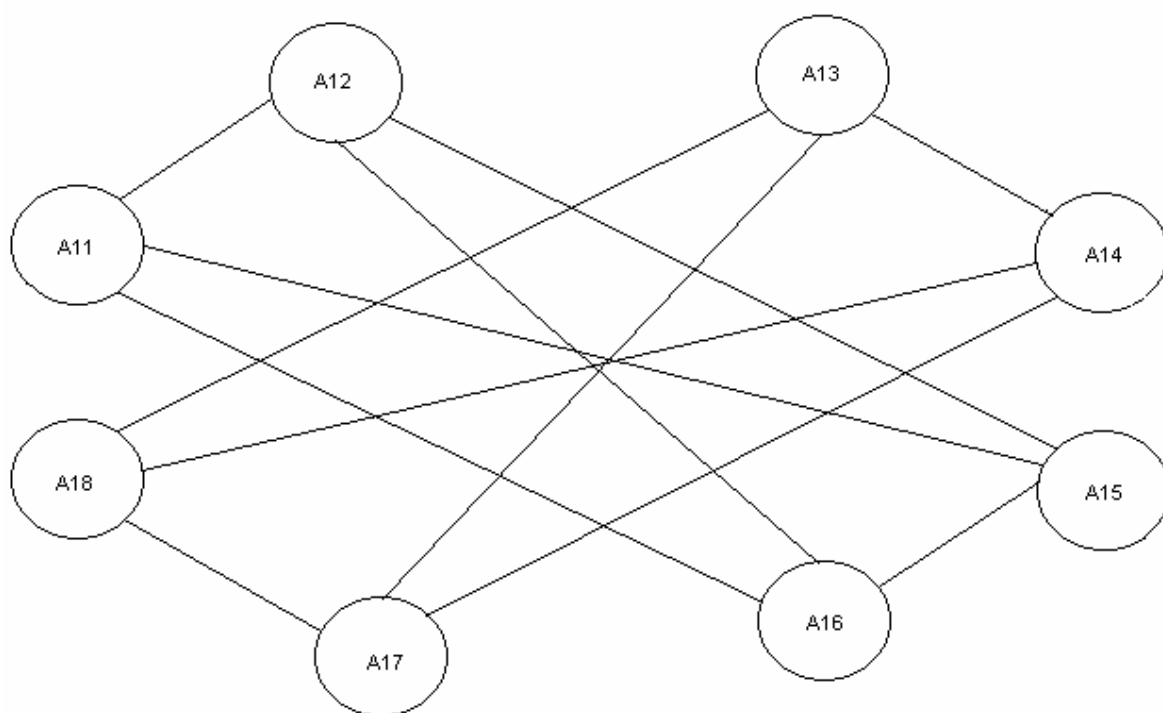
V následujícím textu budou popsány přípravné kroky zmiňované v kapitole 3 v podmínkách řešení soustavy křižovatek.

Jak již bylo řečeno v teoretickém úvodu, je nutno provést:

1. Sestavení grafu bezkoliznosti kde je výsledkem množina fází
2. Výběr minimálního počtu fází
3. Určení pořadí vstupů jednotlivých fází do křižovatky

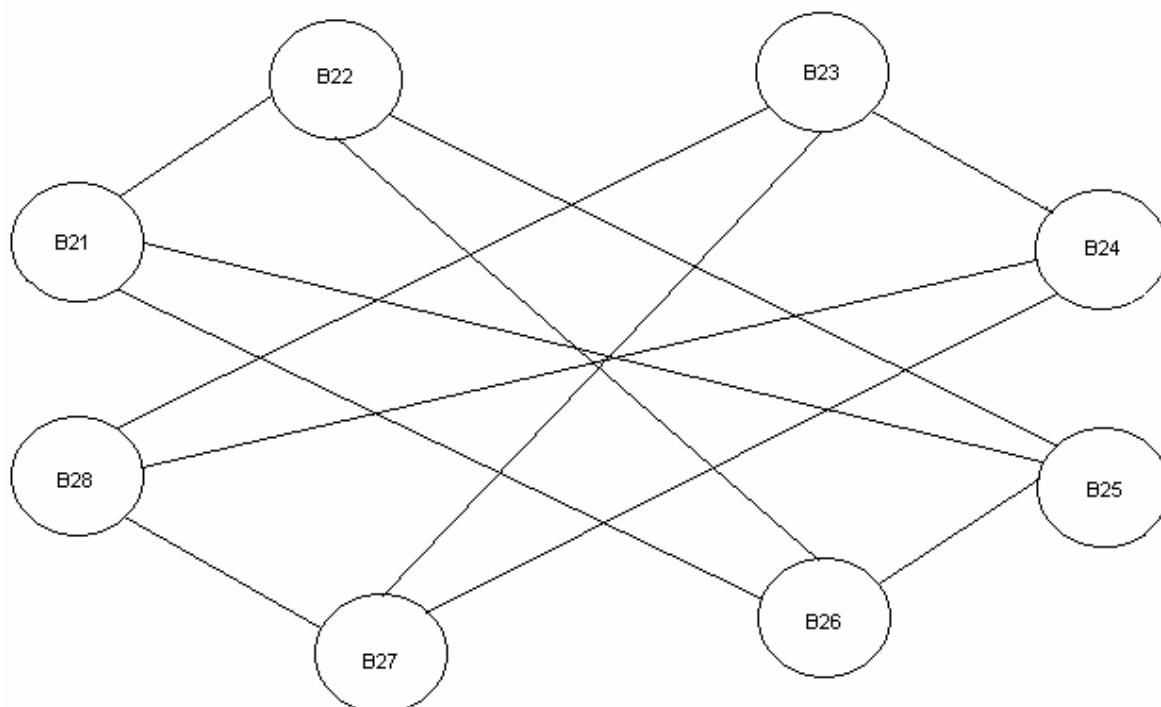
Ad 1 – Sestavení grafu bezkoliznosti

Na základě výše uvedených zásad byly pro každou křižovatku sestaveny grafy bezkoliznosti. Graf bezkoliznosti pro křižovatku K1 je znázorněn na obr. č.10



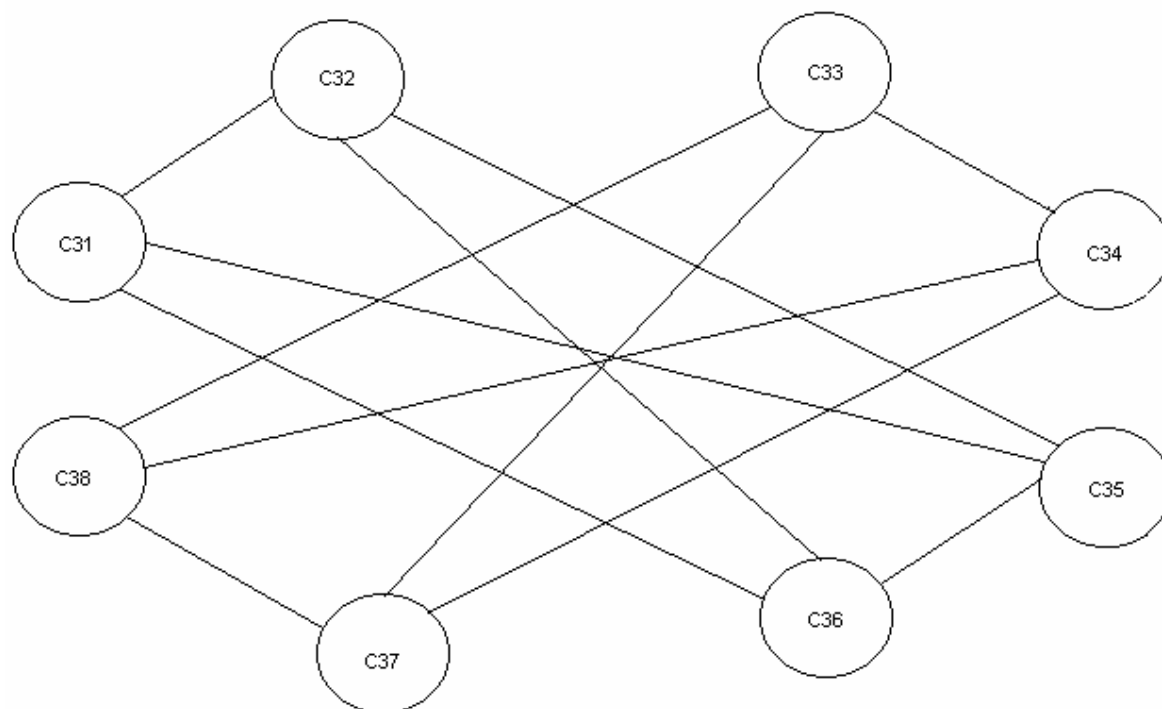
Obr.č.10 Graf bezkoliznosti řešené křižovatky K1

Graf bezkoliznosti pro křižovatku K2 je zobrazen na obr.č.11



Obr.č. 11 Graf bezkoliznosti řešené křižovatky K2

Graf bezkoliznosti pro křižovatku K2 je zobrazen na obr.č.12



Obr.č. 12 Graf bezkoliznosti řešené křižovatky K3

Pro případ řešené soustavy koordinovaných křižovatek jsou pro názornost v každém obrázku grafu bezkoliznosti uvedeny u čísel označujících jednotlivé proudy také písmena označující křižovatky a to A pro křižovatku K1, B pro křižovatku K2 a C pro křižovatku K3. Jak je na první pohled patrné, grafy se liší pouze v označení vrcholů. Je to proto, že stavební i dopravně-inženýrské řešení všech tří křižovatek je v zásadě stejné.

V dalším textu budou dané proudy vstupující do křižovatek označeny pro názornost a jednoduchost zápisu pouze číselným označením zahrnujícím index křižovatky a index proudu. Např. místo značení A11, budou veličiny vztahující se k tomuto proudu označovány symbolem 11 (první index reprezentuje číslo křižovatky, druhý index číslo proudu).

V kapitole 4.1.2 se budu zabývat výběrem minimálního počtu fází. Jak již bylo zmíněno v předcházejícím textu lze výběr provádět matematickým modelem viz výše, nebo intuitivně. Protože vybraný typ křižovatky a její uspořádání dovolují možnost intuitivního výběru, bylo rozhodnuto pro intuitivní výběr.

Co se týče výběru pro řešené křižovatky, byl jako minimální počet fází určen pro každou křižovatku počet dvou fází.

Jednotlivé fáze pro křižovatku K1 zahrnují následující proudy. V první fázi F1 jsou zahrnuty proudy 11,12,15,16. Druhá fáze F2 obsahuje proudy 14, 13, 17, 18.

Jednotlivé fáze pro křižovatku K2 zahrnují tyto proudy. V první fázi F1 jsou zahrnuty proudy 21, 25, 25, 26, druhá fáze F2 zahrnuje proudy 24, 23, 27, 28.

Fáze pro křižovatku K3 zahrnují následující proudy. V první fázi F1 jsou zahrnuty proudy 31, 35, 35, 36, druhá fáze F2 zahrnuje proudy 34, 33, 37, 38.

Dalším krokem v postupu je zjištění v jakém pořadí budou jednotlivé fáze po sobě následovat při vstupu do křižovatky. Protože je v matematickém modelu každému proudu j vstupujícímu do křižovatky i přidělena pouze jedna proměnná modelující začátek doby zelené $z_{i,j}$ a konec doby zelené $k_{i,j}$ musí fáze obsahující stejný proud být řazeny za sebou.

Při určení optimálního pořadí fází se postupuje takto. Při respektování požadavku mít fáze obsahující stejný proud řazené za sebou, se sestaví možná pořadí fází. V rámci těchto jednotlivých pořadí fází se z původní matice mezičasů vytvoří pro každou dvojici fází jdoucích po sobě dílčí tabulky mezičasů. V těchto dílčích tabulkách se vyhledá maximální mezičas, který je rozhodující pro další výpočet a pro jednotlivá pořadí fází se provedou součty maximálních mezičasů. Jako nejvýhodnější pořadí fází je vybráno pořadí, u kterého je součet maximálních mezičasů nejmenší. Pokud existuje více minimálních součtů a je-li součet rozhodujících mezičasů jediným kritériem optimality pořadí fází, potom je možno volit libovolné pořadí fází vyznačující se minimálním součtem maximálních mezičasů.

V případě koordinace křižovatek nemusí platit, že nejvhodnější pořadí fází vybraná pro dané křižovatky jsou nejvýhodnější z pohledu koordinace. V takovém případě je rozhodnutí na provozovateli, které kritérium při sestavení pořadí fází zvolí. V této diplomové práci bude preferováno v podobném případě kritérium koordinace.

Pokud není možné uspořádat fáze tak, aby pro každý proud vstupující ve více fázích bylo splněno, že tyto fáze budou řazené za sebou a situace se nedá řešit ani výměnou dosud

nevybrané fáze za fázi vybranou, je nutno u proudů zařazených ve fázích, které nejdou za sebou, pro potřeby modelování omezit počet vstupů vyřazením proudu z některé fáze. Uplatnění uvedené zásady však nebylo nutné.

Další postup spočívá v určení pořadí v jakém budou jednotlivé fáze po sobě následovat. Toho se dosáhne, jak již bylo uvedeno, v předešlém textu minimalizací součtu maximálních z mezičasu mezi kolizními proudy. V případě řešené soustavy křižovatek byl pro jednotlivé proudy vstupující do křižovatky určen rozhodující mezičas na 5 sekund. V tomto případě není nutné počítat součty maximálních mezičasů a vybírat jejich minimum, neboť jsou tyto hodnoty pro všechny proudy vstupující do křižovatky shodné.

Z předešlého textu plyne, že možné pořadí vstupů jednotlivých fází do křižovatky má tyto dvě možné kombinace. Jako první budou do křižovatky vstupovat proudy obsažené ve fázi F1 a následovat bude fáze F2. Další možností je první vstup fáze F2 a následně vstup fáze F1. Je zřejmé, že tyto dvě možnosti jsou pro všechny řešené křižovatky shodné, a proto bylo rozhodnuto ponechat jako výchozí řešení možnost první, kdy do křižovatky vstupuje nejdříve fáze F1 a následně fáze F2.

4.2 Plán experimentů

Prvním bodem experimentální části práce bude stanovení minimální délky cyklu pro řešenou soustavu křižovatek (základní varianta modelu). Při stanovení délky cyklu bude vycházeno z doporučení [1], že koordinace signálních plánů je účinná, jsou-li křižovatky od sebe vzdáleny maximálně 800 m (což odpovídá době potřebné k projetí této vzdálenosti jednotkovým vozidlem 57,6 s). V této fázi experimentů bude současně zkoumána funkčnost navržených modelů. Vzdálenost bude v modelu zohledněna prostřednictvím časového údaje v sekundách potřebným pro ujetí dané vzdálenosti jednotkového vozidla průměrnou rychlostí $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. V základní variantě modelu bude uvažována hodnota $u = 1$.

Po sestavení základní varianty modelu pro danou soustavu křižovatek (minimalizace délky cyklu) a ověření funkčnosti modelu budou provedena skupina experimentů, při kterých se budou měnit vzdálenosti mezi křižovatkami v přípustném pásmu koordinace (0-800 m) při zachování identického poměru délek stran při zvoleném uspořádání křižovatek (půjde o rovnostranný

trojúhelník). V rámci těchto experimentů bude sledován průběh hodnot optimalizačních kritérií (délka cyklu, minimální poměrná rezerva) v přípustném pásmu použití časové koordinace.

4.3 Řešení matematického modelu soustavy křižovatek v software Xpress - IVE

V této kapitole bude pozornost věnována sestavení a následnému řešení modelu dané soustavy křižovatek pomocí optimalizačního software Xpress – IVE. Tento software byl vyvinut společností FICO v USA. Řešení daného problému bude provedeno ve studentské verzi tohoto produktu, která je volně k dispozici na internetových stránkách této společnosti a vyhovuje potřebám daného řešení problému.

Celkem budou vytvořeny a následně vyřešeny 2 modely.

- model pro minimalizaci délky cyklu **c** pro navržené denní intenzity vozidel,
- model pro maximalizaci minimální poměrné rezervy **u** pro navržené hodinové intenzity vozidel,

V první části podkapitoly 4.3 jsou uvedeny obecné zásady pro transformaci matematického modelu do textu programu v programovacím jazyce MOSEL, se kterým pracuje zvolený optimalizační software. Ve druhé části je pak uveden text programu řešícího matematický model minimalizující délku cyklu **c**, ve třetí části pak text programu řešícího matematický model maximalizující minimální poměrnou rezervu **u**.

4.3.1 Obecné zásady pro transformaci matematického modelu do textu programu Xpress – IVE

Na začátku textu programu musí být uvedeno slovo **model**. Dále následuje název textu programu, který je tímto softwarem vyžadován. Název modelu volí autor sám dle vlastního uvážení. Úvodní část obsahuje klíčová slova **uses "mmxprs"**. Úvod pokračuje deklarační částí,

kteřá začíná klíčovým slovem **declarations** a končí klíčovým slovem **end-declarations**. V deklarační části se definují v případě sestavení modelu konstanty typu pole (array) a všechny proměnné, které v úloze vystupují. Za slovem declarations se doporučuje nadefinovat indexy jednotlivých křižovatek a proudů, které do křižovatek vstupují. V daném programu se jedná o index křižovatky **index_krizovatky =1..3** a index proudů vstupujících do křižovatky **index_proudu =1..8**. Je-li v modelu třeba definovat veličinu typu pole zápis se provede následujícím způsobem:

q:array(index_krizovatky,index_proudu)of real v případě konstant
z:array(index_krizovatky,index_proudu)of mpvar v případě proměnných

Na místě symbolů q a z může být použit jakýkoliv jiný symbol.

V dalším textu programu následuje zavedení hodnot jednotlivých konstant. Pokud je veličina typu pole je to zápisem:

**q::[120,230,340,240,600,120,200,410,200,340,320,100,260,150,90,420,220,
250,460,50,400,120,90,300]**

Konstantu, která není typu pole lze zapsat například tímto způsobem:

T:=5

Symbol T může být pochopitelně nahrazen libovolným jiným symbolem

V textu programu je potřeba uvést název účelové funkce, jejíž hodnota se má optimalizovat (v našem případě minimalizace, nebo maximalizace). Název účelové funkce volí autor zápisu a pro přehlednost je doporučeno volit ji v souladu s cílem optimalizace. V úloze optimalizace řízení křižovatky to mohou být veličiny **minimální poměrná rezerva**, nebo **délka cyklu**.

Dále následuje výpis omezujících podmínek. V případě, je-li to v dané situaci vhodné, lze k tomuto zápisu využít příkazu cyklu (**forall**). Podmínka, kde se využívá tohoto příkazu má tvar např.:

forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)<=c

Je-li třeba, aby proměnné nabývaly celočíselných nezáporných hodnot, musí být soustava omezujících podmínek doplněna způsobem, jak je tomu například u proměnné $z(i,j)$:

forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)z(i,j)is_integer

Dalším příkazem v programu se definuje hledaný extrém účelové funkce, tj. zda se má optimalizovaná veličina maximalizovat, nebo minimalizovat, jak je tomu u uvedených veličin.

maximize(minimalni_pomerna_rezerva)

nebo

minimize (delka_cyklu)

Následuje část textu programu sloužící k výpisu výsledků.

Příkaz **writeln** udává příkaz, aby software vypsál výsledky po ukončení výpočtu. V případě požadavku na výpis hodnoty účelové funkce, která byla označena minimální délkou cyklu, má příkaz tvar:

writeln("Minimalni delka cyklu je:",getobjval)

Pokud chce autor vypsát hodnoty jednotlivých proměnných může tak učinit příkazem ve tvaru:

writeln("Casy zacatku vstupu jednotlivych proudu do krizovatky jsou:")

nebo je možné zadání výpisu provádět pomocí příkazu **cyklus** a to následovně:

forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)writeln("k(",i,",",j,")=",getsol(k(i,j)))

Pro ukončení textu programu následuje klíčové slovo:

end-model

4.3.2 Text programu řešícího model pro minimalizaci délky cyklu

Text programu vytvořený v optimalizačním softwaru pro minimalizaci délky cyklu c při trojúhelníkové konfiguraci křižovatek, doporučené délce pozemních komunikací spojujících křižovatky (800m) a hodnotě minimální poměrné rezervy 1 má tvar:

```
model minc
uses "mmxprs";
declarations
index_krizovatky = 1..3
index_proudu = 1..8
q:array(index_krizovatky,index_proudu)of real
z:array(index_krizovatky,index_proudu)of mpvar
k:array(index_krizovatky,index_proudu)of mpvar
c:mpvar
u:real
end-declarations

u:=1
tvj:=2
tvyk:=5
T:=5
T1:=57.6
T2:=57.6
T3:=57.6
q:=[120,230,340,240,600,120,200,410,200,340,320,100,260,150,90,420,220,
    250,460,50,400,120,90,300]
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)-z(i,j)>=tvj*q(i,j)*c*u/3600
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)-z(i,j)>=T
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)<=c
```

$k(1,1)-z(1,1) \geq 6$
 $k(1,2)-z(1,2) \geq 11.5$
 $k(1,3)-z(1,3) \geq 17$
 $k(1,4)-z(1,4) \geq 12$
 $k(1,5)-z(1,5) \geq 30$
 $k(1,6)-z(1,6) \geq 6$
 $k(1,7)-z(1,7) \geq 10$
 $k(1,8)-z(1,8) \geq 20.5$
 $k(2,1)-z(2,1) \geq 10$
 $k(2,2)-z(2,2) \geq 17$
 $k(2,3)-z(2,3) \geq 16$
 $k(2,4)-z(2,4) \geq 5$
 $k(2,5)-z(2,5) \geq 13$
 $k(2,6)-z(2,6) \geq 7.5$
 $k(2,7)-z(2,7) \geq 4.5$
 $k(2,8)-z(2,8) \geq 21$
 $k(3,1)-z(3,1) \geq 11$
 $k(3,2)-z(3,2) \geq 12.5$
 $k(3,3)-z(3,3) \geq 23$
 $k(3,4)-z(3,4) \geq 2.5$
 $k(3,5)-z(3,5) \geq 15$
 $k(3,6)-z(3,6) \geq 6$
 $k(3,7)-z(3,7) \geq 4.5$

$k(1,1)-z(1,1) \geq 5$
 $k(1,2)-z(1,2) \geq 5$
 $k(1,3)-z(1,3) \geq 5$
 $k(1,4)-z(1,4) \geq 5$
 $k(1,5)-z(1,5) \geq 5$
 $k(1,6)-z(1,6) \geq 5$
 $k(1,7)-z(1,7) \geq 5$
 $k(1,8)-z(1,8) \geq 5$
 $k(2,1)-z(2,1) \geq 5$
 $k(2,2)-z(2,2) \geq 5$

$$k(2,3)-z(2,3)\geq 5$$

$$k(2,4)-z(2,4)\geq 5$$

$$k(2,5)-z(2,5)\geq 5$$

$$k(2,6)-z(2,6)\geq 5$$

$$k(2,7)-z(2,7)\geq 5$$

$$k(2,8)-z(2,8)\geq 5$$

$$k(3,1)-z(3,1)\geq 5$$

$$k(3,2)-z(3,2)\geq 5$$

$$k(3,3)-z(3,3)\geq 5$$

$$k(3,4)-z(3,4)\geq 5$$

$$k(3,5)-z(3,5)\geq 5$$

$$k(3,6)-z(3,6)\geq 5$$

$$k(3,7)-z(3,7)\geq 5$$

$$k(3,8)-z(3,8)\geq 5$$

$$z(1,4)-k(1,1)\geq 5$$

$$z(1,4)-k(1,2)\geq 5$$

$$z(1,4)-k(1,5)\geq 5$$

$$z(1,4)-k(1,6)\geq 5$$

$$z(1,3)-k(1,1)\geq 5$$

$$z(1,3)-k(1,2)\geq 5$$

$$z(1,3)-k(1,5)\geq 5$$

$$z(1,3)-k(1,6)\geq 5$$

$$z(1,7)-k(1,1)\geq 5$$

$$z(1,7)-k(1,2)\geq 5$$

$$z(1,7)-k(1,5)\geq 5$$

$$z(1,7)-k(1,6)\geq 5$$

$$z(1,8)-k(1,1)\geq 5$$

$$z(1,8)-k(1,2)\geq 5$$

$$z(1,8)-k(1,5)\geq 5$$

$$z(1,8)-k(1,6)\geq 5$$

$$z(1,1)-k(1,4) \geq 5-c$$

$$z(1,1)-k(1,3) \geq 5-c$$

$$z(1,1)-k(1,7) \geq 5-c$$

$$z(1,1)-k(1,8) \geq 5-c$$

$$z(1,2)-k(1,4) \geq 5-c$$

$$z(1,2)-k(1,3) \geq 5-c$$

$$z(1,2)-k(1,7) \geq 5-c$$

$$z(1,2)-k(1,8) \geq 5-c$$

$$z(1,5)-k(1,4) \geq 5-c$$

$$z(1,5)-k(1,3) \geq 5-c$$

$$z(1,5)-k(1,7) \geq 5-c$$

$$z(1,5)-k(1,8) \geq 5-c$$

$$z(1,6)-k(1,4) \geq 5-c$$

$$z(1,6)-k(1,3) \geq 5-c$$

$$z(1,6)-k(1,7) \geq 5-c$$

$$z(1,6)-k(1,8) \geq 5-c$$

$$z(2,4)-k(2,1) \geq 5$$

$$z(2,4)-k(2,2) \geq 5$$

$$z(2,4)-k(2,5) \geq 5$$

$$z(2,4)-k(2,6) \geq 5$$

$$z(2,3)-k(2,1) \geq 5$$

$$z(2,3)-k(2,2) \geq 5$$

$$z(2,3)-k(2,5) \geq 5$$

$$z(2,3)-k(2,6) \geq 5$$

$$z(2,7)-k(2,1) \geq 5$$

$$z(2,7)-k(2,2) \geq 5$$

$$z(2,7)-k(2,5) \geq 5$$

$$z(2,7)-k(2,6)\geq 5$$

$$z(2,8)-k(2,1)\geq 5$$

$$z(2,8)-k(2,2)\geq 5$$

$$z(2,8)-k(2,5)\geq 5$$

$$z(2,8)-k(2,6)\geq 5$$

$$z(2,1)-k(2,4)\geq 5-c$$

$$z(2,1)-k(2,3)\geq 5-c$$

$$z(2,1)-k(2,7)\geq 5-c$$

$$z(2,1)-k(2,8)\geq 5-c$$

$$z(2,2)-k(2,4)\geq 5-c$$

$$z(2,2)-k(2,3)\geq 5-c$$

$$z(2,2)-k(2,7)\geq 5-c$$

$$z(2,2)-k(2,8)\geq 5-c$$

$$z(2,5)-k(2,4)\geq 5-c$$

$$z(2,5)-k(2,3)\geq 5-c$$

$$z(2,5)-k(2,7)\geq 5-c$$

$$z(2,5)-k(2,8)\geq 5-c$$

$$z(2,6)-k(2,4)\geq 5-c$$

$$z(2,6)-k(2,3)\geq 5-c$$

$$z(2,6)-k(2,7)\geq 5-c$$

$$z(2,6)-k(2,8)\geq 5-c$$

$$z(3,4)-k(3,1)\geq 5$$

$$z(3,4)-k(3,2)\geq 5$$

$$z(3,4)-k(3,5)\geq 5$$

$$z(3,4)-k(3,6)\geq 5$$

$$z(3,3)-k(3,1)\geq 5$$

$$z(3,3)-k(3,2)\geq 5$$

$$z(3,3)-k(3,5)\geq 5$$

$$z(3,3)-k(3,6)\geq 5$$

$$z(3,7)-k(3,1)\geq 5$$

$$z(3,7)-k(3,2)\geq 5$$

$$z(3,7)-k(3,5)\geq 5$$

$$z(3,7)-k(3,6)\geq 5$$

$$z(3,8)-k(3,1)\geq 5$$

$$z(3,8)-k(3,2)\geq 5$$

$$z(3,8)-k(3,5)\geq 5$$

$$z(3,8)-k(3,6)\geq 5$$

$$z(3,1)-k(3,4)\geq 5-c$$

$$z(3,1)-k(3,3)\geq 5-c$$

$$z(3,1)-k(3,7)\geq 5-c$$

$$z(3,1)-k(3,8)\geq 5-c$$

$$z(3,2)-k(3,4)\geq 5-c$$

$$z(3,2)-k(3,3)\geq 5-c$$

$$z(3,2)-k(3,7)\geq 5-c$$

$$z(3,2)-k(3,8)\geq 5-c$$

$$z(3,5)-k(3,4)\geq 5-c$$

$$z(3,5)-k(3,3)\geq 5-c$$

$$z(3,5)-k(3,7)\geq 5-c$$

$$z(3,5)-k(3,8)\geq 5-c$$

$$z(3,6)-k(3,4)\geq 5-c$$

$$z(3,6)-k(3,3)\geq 5-c$$

$$z(3,6)-k(3,7)\geq 5-c$$

$$z(3,6)-k(3,8)\geq 5-c$$

!Podmínky koordinace

```

z(2,3)+tvyk-T1<=z(1,3)
z(1,8)+tvyk-T1<=z(2,8)
z(2,5)+tvyk-T2<=z(3,5)
z(3,2)+tvyk-T2<=z(2,2)
z(1,5)+tvyk-T3<=z(3,8)
z(3,3)+tvyk-T3<=z(1,2)
k(2,3)>=k(1,3)+T1
k(1,8)>=k(2,8)+T1
k(2,5)>=k(3,5)+T2
k(3,2)>=k(2,2)+T2
k(1,5)>=k(3,8)+T3
k(3,3)>=k(1,2)+T3

forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)z(i,j)is_integer
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)is_integer

minimize (c)

writeln("Minimalni delka cyklu je:",getobjval)
writeln
writeln("Casy zacatku vstupu jednotlivych proudu do krizovatky jsou:")
writeln
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)writeln("z(",i,"","j,")=",getsol(z(i,j)))
writeln
writeln("Casy koncu vstupu jednotlivych proudu do krizovatky jsou :")
writeln
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)writeln("k(",i,"","j,")=",getsol(k(i,j)))
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)writeln("Pomerna rezerva pro
proud(",i,"","j,")je:",getsol(((k(i,j)-z(i,j))*3600)/((tvj*q(i,j)*u))))
end-model

```

Po odladění textu programu a ukončení výpočtu bylo dosaženo následujících výsledků:

Minimální délka cyklu byla stanovena na hodnotě 417 s.

Časy začátků vstupů jednotlivých proudů do křižovatky jsou:

$$z(1,1)=0$$

$$z(1,2)=90$$

$$z(1,3)=275$$

$$z(1,4)=275$$

$$z(1,5)=0$$

$$z(1,6)=0$$

$$z(1,7)=275$$

$$z(1,8)=275$$

$$z(2,1)=0$$

$$z(2,2)=0$$

$$z(2,3)=156$$

$$z(2,4)=156$$

$$z(2,5)=0$$

$$z(2,6)=0$$

$$z(2,7)=156$$

$$z(2,8)=223$$

$$z(3,1)=0$$

$$z(3,2)=0$$

$$z(3,3)=142$$

$$z(3,4)=142$$

$$z(3,5)=0$$

$$z(3,6)=0$$

$$z(3,7)=142$$

$$z(3,8)=142$$

Časy konců vstupu jednotlivých proudů do křižovatky jsou :

$$k(1,1)=28$$

$$k(1,2)=144$$

$$k(1,3)=354$$

$$k(1,4)=331$$

$$k(1,5)=270$$

$k(1,6)=28$
 $k(1,7)=322$
 $k(1,8)=411$
 $k(2,1)=47$
 $k(2,2)=79$
 $k(2,3)=412$
 $k(2,4)=180$
 $k(2,5)=151$
 $k(2,6)=35$
 $k(2,7)=177$
 $k(2,8)=353$
 $k(3,1)=51$
 $k(3,2)=137$
 $k(3,3)=249$
 $k(3,4)=155$
 $k(3,5)=93$
 $k(3,6)=28$
 $k(3,7)=164$
 $k(3,8)=212$

Časy začátků a konců vstupů jednotlivých proudů do křižovatky jsou udávány v sekundách a počítají se od začátku cyklu.

4.3.3 Text programu řešícího model pro maximalizaci minimální poměrné rezervy

Text programu vytvořený v optimalizačním softwaru pro maximalizaci minimální poměrné rezervy **u** při trojúhelníkové konfiguraci křižovatek, doporučené délce pozemních komunikací spojujících křižovatky (800m) a hodnotě délky cyklu 417 s má tvar:

```

model max_u
uses "mmxprs";
declarations

```

```

index_krizovatky =1..3
index_proudu =1..8
q:array(index_krizovatky,index_proudu)of real
z:array(index_krizovatky,index_proudu)of mpvar
k:array(index_krizovatky,index_proudu)of mpvar
u:mpvar
end-declarations

c:=417
tvj:=2
tvyk:=5
T:=5
T1:=57.6
T2:=57.6
T3:=57.6
q:=[120,230,340,240,600,120,200,410,200,340,320,100,260,150,90,420,220,
    250,460,50,400,120,90,300]
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)-z(i,j)>=tvj*q(i,j)*c*u/3600
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)-z(i,j)>=T
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)<=c

k(1,1)-z(1,1)>=6
k(1,2)-z(1,2)>=11.5
k(1,3)-z(1,3)>=17
k(1,4)-z(1,4)>=12
k(1,5)-z(1,5)>=30
k(1,6)-z(1,6)>=6
k(1,7)-z(1,7)>=10
k(1,8)-z(1,8)>=20.5
k(2,1)-z(2,1)>=10
k(2,2)-z(2,2)>=17
k(2,3)-z(2,3)>=16
k(2,4)-z(2,4)>=5
k(2,5)-z(2,5)>=13

```


$k(2,6)-z(2,6) \geq 7.5$
 $k(2,7)-z(2,7) \geq 4.5$
 $k(2,8)-z(2,8) \geq 21$
 $k(3,1)-z(3,1) \geq 11$
 $k(3,2)-z(3,2) \geq 12.5$
 $k(3,3)-z(3,3) \geq 23$
 $k(3,4)-z(3,4) \geq 2.5$
 $k(3,5)-z(3,5) \geq 15$
 $k(3,6)-z(3,6) \geq 6$
 $k(3,7)-z(3,7) \geq 4.5$

$k(1,1)-z(1,1) \geq 5$
 $k(1,2)-z(1,2) \geq 5$
 $k(1,3)-z(1,3) \geq 5$
 $k(1,4)-z(1,4) \geq 5$
 $k(1,5)-z(1,5) \geq 5$
 $k(1,6)-z(1,6) \geq 5$
 $k(1,7)-z(1,7) \geq 5$
 $k(1,8)-z(1,8) \geq 5$
 $k(2,1)-z(2,1) \geq 5$
 $k(2,2)-z(2,2) \geq 5$
 $k(2,3)-z(2,3) \geq 5$
 $k(2,4)-z(2,4) \geq 5$
 $k(2,5)-z(2,5) \geq 5$
 $k(2,6)-z(2,6) \geq 5$
 $k(2,7)-z(2,7) \geq 5$
 $k(2,8)-z(2,8) \geq 5$
 $k(3,1)-z(3,1) \geq 5$
 $k(3,2)-z(3,2) \geq 5$
 $k(3,3)-z(3,3) \geq 5$
 $k(3,4)-z(3,4) \geq 5$
 $k(3,5)-z(3,5) \geq 5$
 $k(3,6)-z(3,6) \geq 5$
 $k(3,7)-z(3,7) \geq 5$

$$k(3,8)-z(3,8)\geq 5$$

$$z(1,4)-k(1,1)\geq 5$$

$$z(1,4)-k(1,2)\geq 5$$

$$z(1,4)-k(1,5)\geq 5$$

$$z(1,4)-k(1,6)\geq 5$$

$$z(1,3)-k(1,1)\geq 5$$

$$z(1,3)-k(1,2)\geq 5$$

$$z(1,3)-k(1,5)\geq 5$$

$$z(1,3)-k(1,6)\geq 5$$

$$z(1,7)-k(1,1)\geq 5$$

$$z(1,7)-k(1,2)\geq 5$$

$$z(1,7)-k(1,5)\geq 5$$

$$z(1,7)-k(1,6)\geq 5$$

$$z(1,8)-k(1,1)\geq 5$$

$$z(1,8)-k(1,2)\geq 5$$

$$z(1,8)-k(1,5)\geq 5$$

$$z(1,8)-k(1,6)\geq 5$$

$$z(1,1)-k(1,4)\geq 5-c$$

$$z(1,1)-k(1,3)\geq 5-c$$

$$z(1,1)-k(1,7)\geq 5-c$$

$$z(1,1)-k(1,8)\geq 5-c$$

$$z(1,2)-k(1,4)\geq 5-c$$

$$z(1,2)-k(1,3)\geq 5-c$$

$$z(1,2)-k(1,7)\geq 5-c$$

$$z(1,2)-k(1,8)\geq 5-c$$

$$z(1,5)-k(1,4)\geq 5-c$$

$$z(1,5)-k(1,3)\geq 5-c$$

$$z(1,5)-k(1,7) \geq 5-c$$

$$z(1,5)-k(1,8) \geq 5-c$$

$$z(1,6)-k(1,4) \geq 5-c$$

$$z(1,6)-k(1,3) \geq 5-c$$

$$z(1,6)-k(1,7) \geq 5-c$$

$$z(1,6)-k(1,8) \geq 5-c$$

$$z(2,4)-k(2,1) \geq 5$$

$$z(2,4)-k(2,2) \geq 5$$

$$z(2,4)-k(2,5) \geq 5$$

$$z(2,4)-k(2,6) \geq 5$$

$$z(2,3)-k(2,1) \geq 5$$

$$z(2,3)-k(2,2) \geq 5$$

$$z(2,3)-k(2,5) \geq 5$$

$$z(2,3)-k(2,6) \geq 5$$

$$z(2,7)-k(2,1) \geq 5$$

$$z(2,7)-k(2,2) \geq 5$$

$$z(2,7)-k(2,5) \geq 5$$

$$z(2,7)-k(2,6) \geq 5$$

$$z(2,8)-k(2,1) \geq 5$$

$$z(2,8)-k(2,2) \geq 5$$

$$z(2,8)-k(2,5) \geq 5$$

$$z(2,8)-k(2,6) \geq 5$$

$$z(2,1)-k(2,4) \geq 5-c$$

$$z(2,1)-k(2,3) \geq 5-c$$

$$z(2,1)-k(2,7) \geq 5-c$$

$$z(2,1)-k(2,8) \geq 5-c$$

$$z(2,2)-k(2,4) \geq 5-c$$

$$z(2,2)-k(2,3) \geq 5-c$$

$$z(2,2)-k(2,7) \geq 5-c$$

$$z(2,2)-k(2,8) \geq 5-c$$

$$z(2,5)-k(2,4) \geq 5-c$$

$$z(2,5)-k(2,3) \geq 5-c$$

$$z(2,5)-k(2,7) \geq 5-c$$

$$z(2,5)-k(2,8) \geq 5-c$$

$$z(2,6)-k(2,4) \geq 5-c$$

$$z(2,6)-k(2,3) \geq 5-c$$

$$z(2,6)-k(2,7) \geq 5-c$$

$$z(2,6)-k(2,8) \geq 5-c$$

$$z(3,4)-k(3,1) \geq 5$$

$$z(3,4)-k(3,2) \geq 5$$

$$z(3,4)-k(3,5) \geq 5$$

$$z(3,4)-k(3,6) \geq 5$$

$$z(3,3)-k(3,1) \geq 5$$

$$z(3,3)-k(3,2) \geq 5$$

$$z(3,3)-k(3,5) \geq 5$$

$$z(3,3)-k(3,6) \geq 5$$

$$z(3,7)-k(3,1) \geq 5$$

$$z(3,7)-k(3,2) \geq 5$$

$$z(3,7)-k(3,5) \geq 5$$

$$z(3,7)-k(3,6) \geq 5$$

$$z(3,8)-k(3,1) \geq 5$$

$$z(3,8)-k(3,2) \geq 5$$

$$z(3,8)-k(3,5) \geq 5$$

$$z(3,8)-k(3,6) \geq 5$$

$$z(3,1)-k(3,4)\geq 5-c$$

$$z(3,1)-k(3,3)\geq 5-c$$

$$z(3,1)-k(3,7)\geq 5-c$$

$$z(3,1)-k(3,8)\geq 5-c$$

$$z(3,2)-k(3,4)\geq 5-c$$

$$z(3,2)-k(3,3)\geq 5-c$$

$$z(3,2)-k(3,7)\geq 5-c$$

$$z(3,2)-k(3,8)\geq 5-c$$

$$z(3,5)-k(3,4)\geq 5-c$$

$$z(3,5)-k(3,3)\geq 5-c$$

$$z(3,5)-k(3,7)\geq 5-c$$

$$z(3,5)-k(3,8)\geq 5-c$$

$$z(3,6)-k(3,4)\geq 5-c$$

$$z(3,6)-k(3,3)\geq 5-c$$

$$z(3,6)-k(3,7)\geq 5-c$$

$$z(3,6)-k(3,8)\geq 5-c$$

!Podmínky koordinace

$$z(2,3)+\text{tvyk}-T1\leq z(1,3)$$

$$z(1,8)+\text{tvyk}-T1\leq z(2,8)$$

$$z(2,5)+\text{tvyk}-T2\leq z(3,5)$$

$$z(3,2)+\text{tvyk}-T2\leq z(2,2)$$

$$z(1,5)+\text{tvyk}-T3\leq z(3,8)$$

$$z(3,3)+\text{tvyk}-T3\leq z(1,2)$$

$$k(2,3)\geq k(1,3)+T1$$

$$k(1,8)\geq k(2,8)+T1$$

$$k(2,5)\geq k(3,5)+T2$$

$$k(3,2)\geq k(2,2)+T2$$

$$k(1,5)\geq k(3,8)+T3$$

$$k(3,3)\geq k(1,2)+T3$$

```

forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)z(i,j)is_integer
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)k(i,j)is_integer

minimalni_pomerna_rezerva:= u

maximize(minimalni_pomerna_rezerva)

writeln("Maximalizovana minimalni pomerna rezerva je:",getobjval)
writeln
writeln("Časy začátku vstupu jednotlivých proudů do křižovatky jsou:")
writeln
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)writeln("z(",i,"","j,"")=",getsol(z(i,j)))
writeln
writeln("Časy konce vstupu jednotlivých proudů do křižovatky jsou:")
writeln
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)writeln("k(",i,"","j,"")=",getsol(k(i,j)))
forall(i in index_krizovatky,j in index_proudu)writeln("Poměrná rezerva pro
proud(",i,"","j,"")je:",getsol(((k(i,j)-z(i,j))*3600)/((tvj*q(i,j)*c))))
end-model

```

Po odladění textu programu a ukončení optimalizačního výpočtu bylo dosaženo těchto výsledků:

Maximalizovaná minimální poměrná rezerva je:1.00296

Časy začátků vstupů jednotlivých proudů do křižovatky jsou:

```

z(1,1)=0
z(1,2)=93
z(1,3)=278
z(1,4)=279
z(1,5)=0
z(1,6)=0
z(1,7)=279
z(1,8)=279
z(2,1)=4

```

$z(2,2)=3$
 $z(2,3)=156$
 $z(2,4)=156$
 $z(2,5)=3$
 $z(2,6)=4$
 $z(2,7)=156$
 $z(2,8)=228$
 $z(3,1)=0$
 $z(3,2)=0$
 $z(3,3)=145$
 $z(3,4)=145$
 $z(3,5)=0$
 $z(3,6)=0$
 $z(3,7)=145$
 $z(3,8)=145$

Časy konců vstupů jednotlivých proudů do křižovatky jsou :

$k(1,1)=28$
 $k(1,2)=149$
 $k(1,3)=357$
 $k(1,4)=336$
 $k(1,5)=273$
 $k(1,6)=28$
 $k(1,7)=327$
 $k(1,8)=384$
 $k(2,1)=52$
 $k(2,2)=82$
 $k(2,3)=415$
 $k(2,4)=180$
 $k(2,5)=151$
 $k(2,6)=40$
 $k(2,7)=177$
 $k(2,8)=326$
 $k(3,1)=52$
 $k(3,2)=140$
 $k(3,3)=255$
 $k(3,4)=159$
 $k(3,5)=93$
 $k(3,6)=28$
 $k(3,7)=168$
 $k(3,8)=215$

Dále budou vypsány hodnoty poměrných rezerv pro jednotlivé proměnné:

Poměrná rezerva pro proud(1,1) je: 1.00719

Poměrná rezerva pro proud(1,2) je: 1.05099

Pomerna rezerva pro proud(1,3)je:1.00296

Pomerna rezerva pro proud(1,4)je:1.02518

Pomerna rezerva pro proud(1,5)je:1.96403

Pomerna rezerva pro proud(1,6)je:1.00719

Pomerna rezerva pro proud(1,7)je:1.03597

Pomerna rezerva pro proud(1,8)je:1.10546

Pomerna rezerva pro proud(2,1)je:1.03597

Pomerna rezerva pro proud(2,2)je:1.00296

Pomerna rezerva pro proud(2,3)je:3.49371

Pomerna rezerva pro proud(2,4)je:1.03597

Pomerna rezerva pro proud(2,5)je:2.45711

Pomerna rezerva pro proud(2,6)je:1.03597

Pomerna rezerva pro proud(2,7)je:1.00719

Pomerna rezerva pro proud(2,8)je:1.00719

Pomerna rezerva pro proud(3,1)je:1.02027

Pomerna rezerva pro proud(3,2)je:2.41727

Pomerna rezerva pro proud(3,3)je:1.03222

Pomerna rezerva pro proud(3,4)je:1.20863

Pomerna rezerva pro proud(3,5)je:1.0036

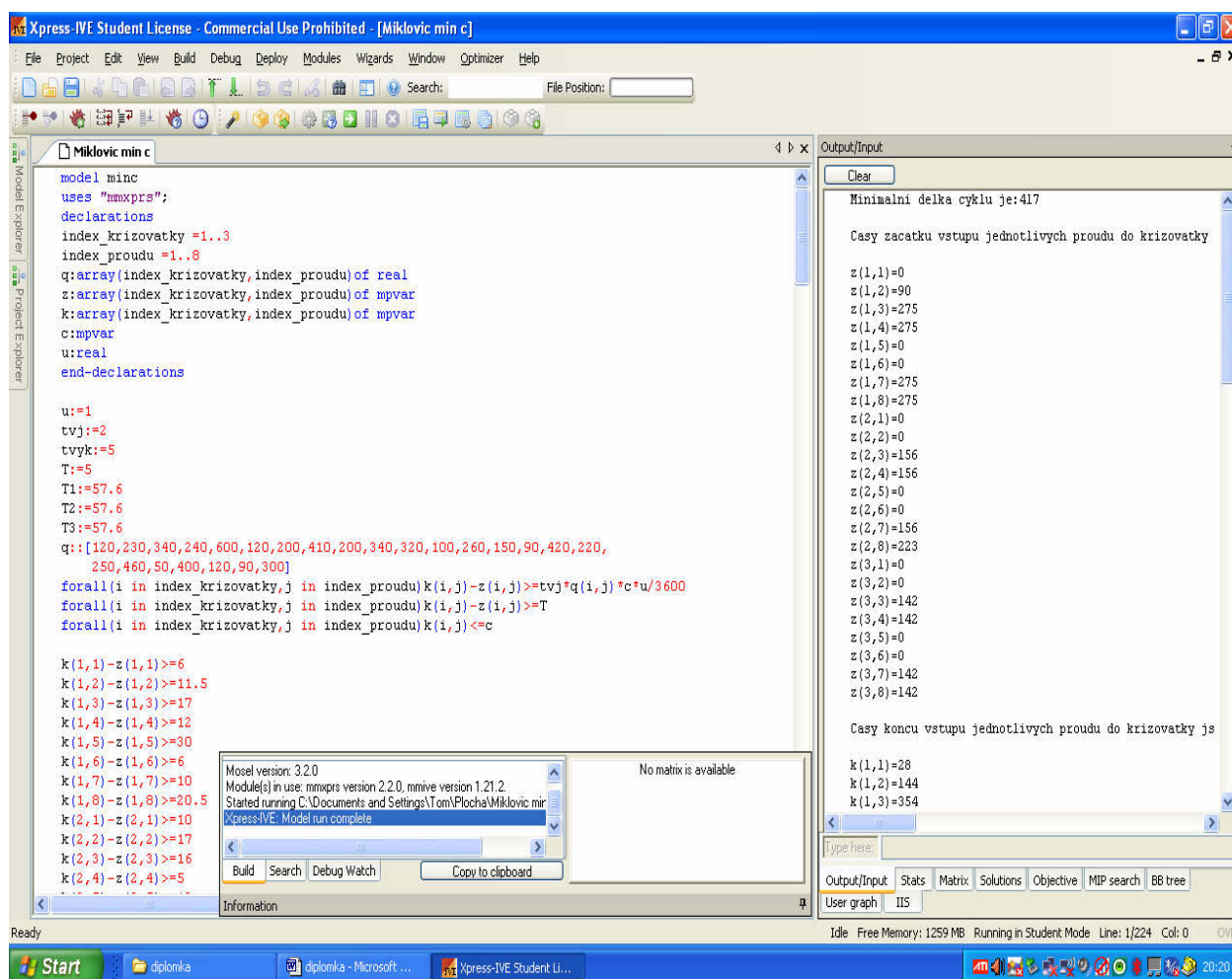
Pomerna rezerva pro proud(3,6)je:1.00719

Pomerna rezerva pro proud(3,7)je:1.10312

Pomerna rezerva pro proud(3,8)je:1.00719

Jak je z výsledků dosažených z experimentu č. 2 patrné, činí hodnota účelové funkce 1,00296. Dosažení hodnoty, která se bude nacházet v těsném okolí nad hodnotou 1 se dalo očekávat, vstupním údajem byla totiž minimální délka cyklu, která byla vypočítána pro hodnotu poměrné rezervy $u=1$. Daný výpočet je tedy možno považovat za jistou formu kontroly správné funkce modelu.

Aplikaci sestaveného modelu v prostředí optimalizačního softwaru Xpress- IVE včetně výsledků obdržných pro model minimalizace délky cyklu, začátky a konce vstupu jednotlivých proudů jsou nezáporné celočíselné proměnné, je zřejmá z obr. č. 13



Obr. č. 13 Pracovní prostředí optimalizačního softwaru Xpress – IVE

4.3.4 Experimenty související se změnami vzdáleností mezi křižovatkami

Po stanovení základních parametrů dané soustavy byly provedeny experimenty se změnami vzdáleností mezi křižovatkami při zachování identických délek stran rovnostranného trojúhelníka (tzn., že délky jednotlivých komunikací se mění ve stále stejném poměru). Pro navržený experiment byl použit model uvedený v předchozí kapitole. Změny byly do modelu zadávány prostřednictvím změn dob potřebných k projetí mezikřižovatkových úseků vyjádřených v sekundách (změny doby reprezentovaly změny délek komunikací). Sledovanou veličinou byla délka cyklu při minimální poměrné rezervě $u = 1$. Čas nutný pro ujetí dané vzdálenosti byl do modelu zadáván v intervalu 10 až 130 s po deseti sekundách. Jediným časem, který se vymyká uvedenému časovému schématu, je čas 57,6 s, který reprezentuje maximální

doporučovanou délku komunikací v mezikřižovatkových úsecích. Jako další v pořadí byly realizovány experimenty s konstantní délkou cyklu 417 s, při nichž se opět sledovala hodnota optimalizačního kritéria (tentokrát minimální poměrné rezervy) v závislosti na změnách délek mezikřižovatkových úseků. Nedílnou součástí výsledků daných experimentů byly kromě hodnot optimalizačního kritéria také časy začátků a konců dob zelených pro jednotlivé proudy, viz příloha č. 1. Změny pozorovaných parametrů jsou shrnuty v tabulce č. 3 (změna délky cyklu závislá na změně vzdáleností mezi křižovatkami) a v tabulce č.4 (změna minimální poměrné rezervy v závislosti na změně vzdáleností mezi křižovatkami).

Doba jízdy (s)	Minimální délka cyklu (s)
10	100
30	232
57,6	417
60	431
70	496
80	561
90	628
100	693
110	760
130	892

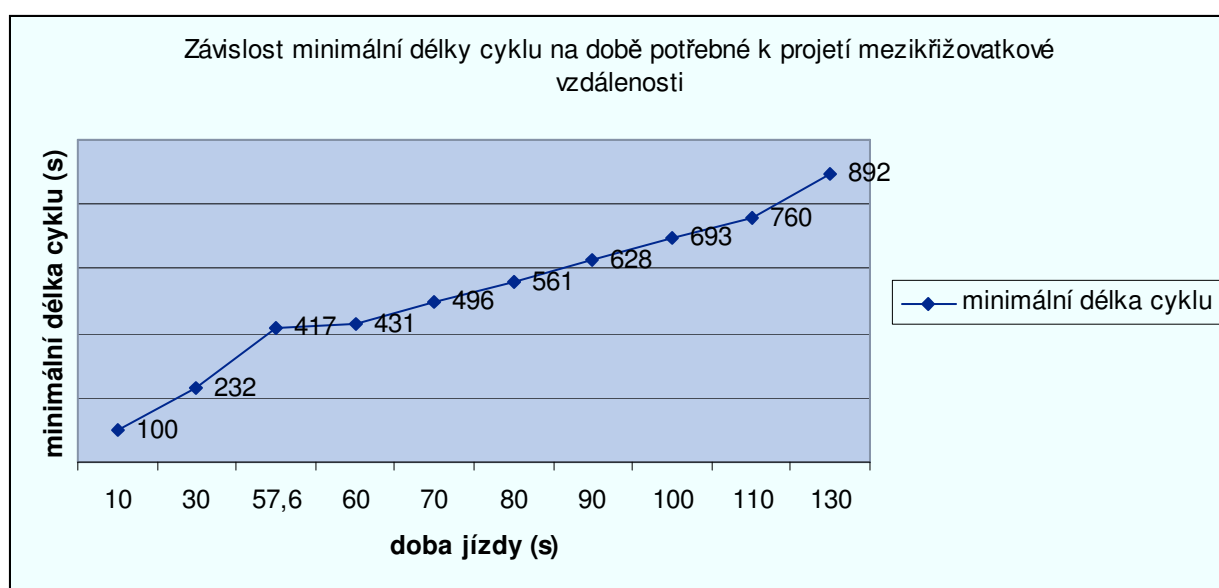
Tab. č. 3 Změna hodnot délky cyklu závislá na změně vzdáleností mezi křižovatkami

Doba jízdy (s)	Minimální poměrná rezerva (-)
10	1.48921
30	1.36691
57,6	1.00296
60	0.977571
70	0.837918
80	0.710961
90	0.57554
100	0.44435
110	0.316547
130	množina přípustných řešení je prázdná

Tab. č. 4 Změna hodnot minimální poměrné rezervy v závislosti na změně vzdáleností mezi křižovatkami

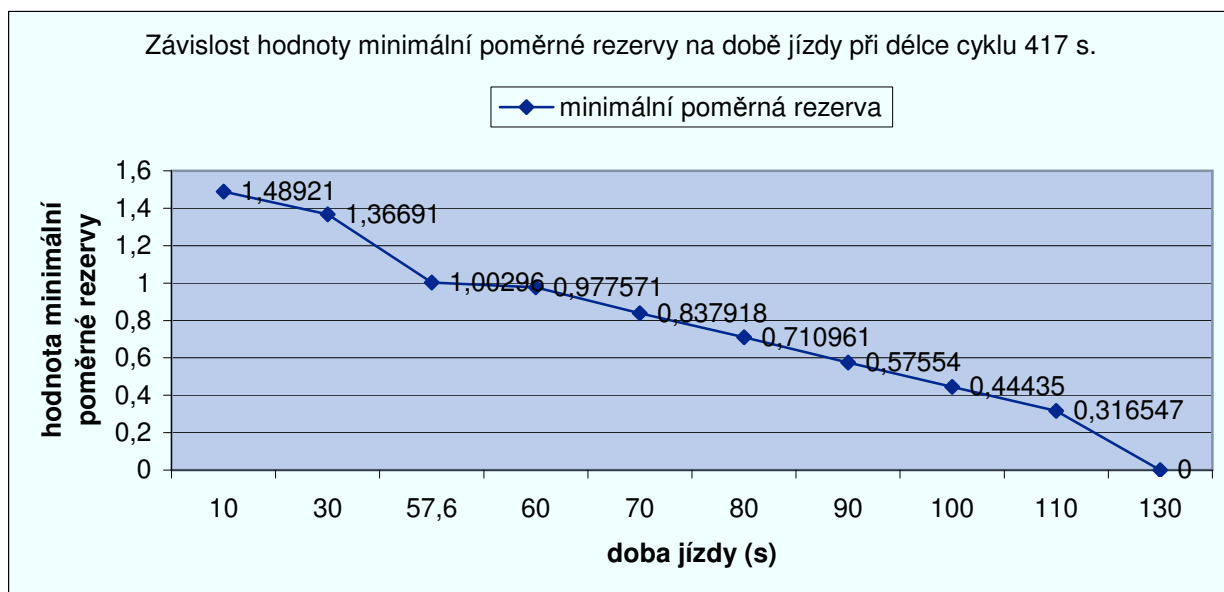
Při provedení tohoto experimentu byla zjištěna mezní hodnota existence přípustných řešení, přičemž uvedená hranice má hodnotu 121 s (doba jízdy). Délka doby jízdy byla počínaje hodnotou 110 s postupně zvyšována po 0,5 s, přičemž vypočítatelnost modelu byla ukončena na hodnotě 121 s. Hodnota maximalizované minimální poměrné rezervy při hodnotě 121 s činila 0.0719424. Je však nutno si uvědomit, že i tak, počínaje hodnotou doby jízdy 57,6 s se přechází do oblasti nepřípustných řešení, protože minimálně v případě jednoho proudu není splněno, že nabízená doba zelené je s ohledem na požadavek dostatečná.

V grafu č. 1 je patrný trend délky cyklu v závislosti na době jízdy v mezikřižovatkovém úseku.



Graf č. 1 Závislost minimální délky cyklu na době potřebné k projetí mezikřižovatkové vzdálenosti

V grafu č. 2 je patrný trend hodnoty minimální poměrné rezervy na době jízdy v mezikřižovatkové vzdálenosti při délce cyklu 417 s.



graf č.2 Závislost hodnoty minimální poměrné rezervy na době jízdy při délce cyklu 417 s.

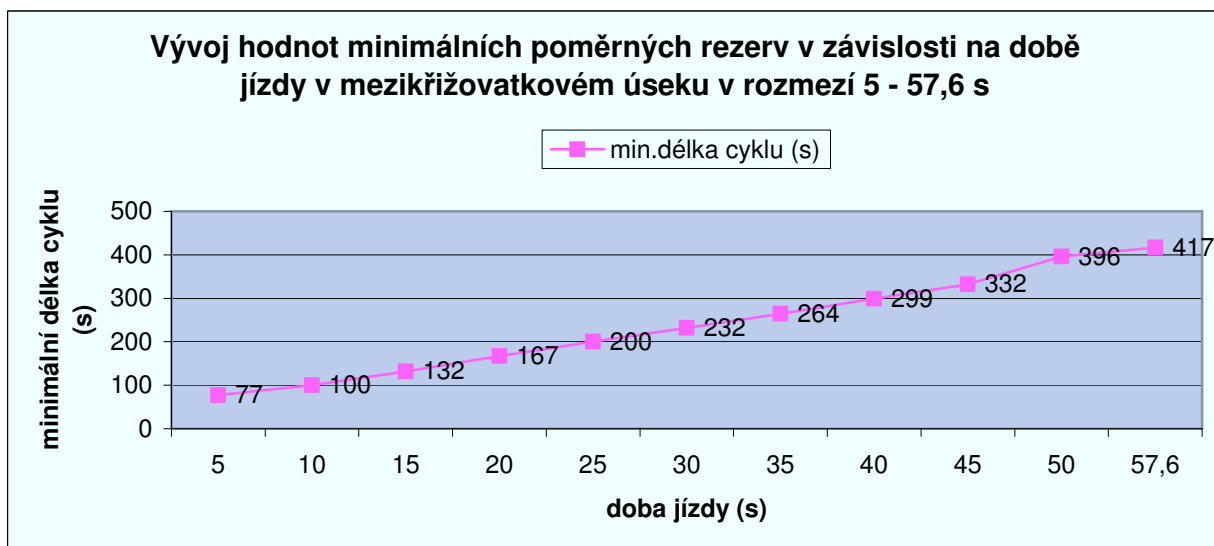
4.3.5 Experimenty za účelem zjištění průběhu hodnoty minimální poměrné rezervy v přípustném pásmu doby jízdy mezi křižovatkami

Posledním typem experimentů provedených s navrženými modely byly experimenty vedoucí ke zjištění podrobnějšího průběhu hodnoty minimální poměrné rezervy v přípustném pásmu doby jízdy mezi křižovatkami a tím i v přípustném pásmu koordinovatelnosti. Z předchozího textu plyne, že přípustné pásmo jízdy mezi křižovatkami v daném trojúhelníkovém uspořádání je podmíněno dodržením doporučení uvedeného v odborné literatuře a sice, že nejdelší spojnice mezi křižovatkami, na kterých se uplatňuje koordinace, má mít délku maximálně 800 metrů. Při nedodržení daného doporučení může nastat rozpad kolony vozidel pohybujících se mezi koordinovanými křižovatkami. Tato maximální délka spojnice tvoří horní hranici použitelného pásma koordinovatelnosti. Proto bylo rozhodnuto pro tento experiment rozdělit časový interval jízdy jednotkových vozidel mezi křižovatkami po pěti sekundách. Doba jízdy mezi křižovatkami byla tedy zadávána po 5 s v rozmezí od 5 s do 57,6 s. Výsledkem tohoto experimentu byl podrobný popis chování minimální poměrné rezervy znázorněný v tabulce č. 5 a

grafu č.3. Dále byl pro každý dílčí výsledek navržen signální plán ve formě výstupu z optimalizačního softwaru Xpress-IVE .Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze č.2.

Doba jízdy (s)	Minimální poměrná rezerva
5	1.48921
10	1.48921
15	1.46763
20	1.44913
25	1.40923
30	1.36691
35	1.30766
40	1.23741
45	1.16801
50	1.10453
55	1.04105
57,6	1.00296

Tab.č. 5 Vývoj hodnoty minimální poměrné rezervy v závislosti na době jízdy



Graf č.3 Vývoj hodnot minimálních poměrných rezerv v závislosti na době jízdy v mezikřižovatkovém úseku v rozmezí 5 - 57,6 s

Z daného experimentu je zřejmé, že řešením sestavených modelů lze při konstantní délce cyklu 417 s získat hodnoty minimálních poměrných rezerv v rozmezí od 1,00296 do 1,48921.

Výsledkem experimentů je tedy podrobnější průběh hodnoty minimální poměrné rezervy v pásmu koordinovatelnosti v podmínkách zkoumané trojúhelníkové konfigurace křižovatek. V tomto pásmu je možno navrhnout signální plány pro řízení světelného signalizačního zařízení na koordinovaných křižovatkách. Signální plány jsou uvedeny v příloze č.2 jako výpis z optimalizačního softwaru Xpress – IVE .

Jedna z možností, jak může signální plán pro trojúhelníkovou konfiguraci vypadat, je znázorněna na obr. č. 14. Jedná se o signální plán vyhotovený pro délku cyklu 167. Tato délku je z pohledu praktického využívání preferována před např. délkou cyklu 417 s, kterou se nedoporučuje využívat (obecně se nedoporučuje volit délku cyklu vyšší než 200 s).



Obr.č.14 Signální plán při délce cyklu 167 s

5 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V kapitole 5 budou zhodnoceny výsledky optimalizačních experimentů získané řešením sestavených modelů v softwaru Xpress – IVE.

Optimalizační experimenty v této diplomové práci jsou založeny na návrhu matematického modelu plošné koordinace dopravních proudů v trojúhelníkovém prostorovém uspořádání. Je třeba zmínit fakt, že odborná literatura je k problematice plošné koordinace křižovatek velice skoupá. Z oblasti koordinace se zaměřuje pouze na problematiku koordinace liniové.

V první části experimentů bylo nutné sestavit daný matematický model, který by zohledňoval požadavky síťové koordinace. Za účelem verifikace efektivity modelu při řešení bylo nutné vycházet z hodnot vycházejících z reality v oblasti intenzit vstupujících proudů do křižovatky a dalších časových aspektů potřebných pro návrh řešení.

Po sestavení daného modelu pro minimalizaci délky cyklu a maximalizaci minimální poměrné rezervy mezi nabízenou a průměrně požadovanou délkou doby zelené a testu jeho funkčnosti, následovaly další dva experimenty.

Základem pro tyto experimenty byla změna délek komunikací, které spojují dané křižovatky. Délky těchto spojnic byly vyjádřeny dobami, které potřebuje jednotkové vozidlo pro překonání této vzdálenosti. Na základě navržených změn vzdáleností byl sledován průběh minimální potřebná délka cyklu a průběh hodnoty minimální poměrné rezervy. Účelem těchto experimentů bylo zjištění pásma koordinovatelnosti křižovatek. Pro každý experiment ve zjištěném pásmu použitelnosti byl optimalizačním softwarem sestaven signální plán. Tento signální plán převádí výpis začátků a konců vstupů jednotlivých proudů do křižovatky na vizuální podklad, kde je možno spatřit délky jednotlivých signálů na jednotlivých návěstidlech, viz ukázka uvedená výše v textu.

Tyto experimenty ukázaly míru realizovatelnosti (viz pásmo koordinovatelnosti) návrhu síťové koordinace dopravních proudů v prostoru. Je však nutno poznamenat, že z uvedených grafů a tabulek nelze v této fázi experimentování činit obecné závěry, neboť plošná koordinace je

závislá na mnoha parametrech vstupujících do matematického modelu. Je možné, že pro jinak zadané parametry, ať již se bude jednat o intenzity jednotlivých proudů nebo o doby potřebné pro vstup jednotkového vozidla do křižovatky nebo o minimální dobu zelené pro dané proudy, nebude možno koordinaci úspěšně provádět. Je také nutné brát ohled na rozmístění křižovatek v prostoru. V předložené diplomové práci se bere na zřetel pouze stejná vzdálenost mezi křižovatkami. Otázkou zůstává, jak by se vyvíjela koordinace při různých délkách spojnic. Dalším faktorem ovlivňujícím koordinaci je poloha a technicko stavební uspořádání daných křižovatek.

Velice důležitým poznatkem z provedených experimentů je prokazatelnost použití lineárního programování pro síťovou koordinaci. Sestavený matematický model má totiž natolik obecnou strukturu, že se dá použít po úpravách pro jakýkoliv typ plošné koordinace. Efektivita postupu řešení problému síťové koordinace souvisí se skutečným uspořádáním infrastruktury v lokalitě, kde se plošná koordinace provádí. Je také třeba brát ohled na hledisko kompletů pohybujících se po dané síti.

Předložená práce předkládá konkrétní návod, jak řešit otázky síťové koordinace dopravních proudů.

6 ZÁVĚR

Matematické modelování poskytuje efektivní nástroje k řešení mnoha problémů vyskytujících se v běžném životě. Není tomu jinak ani v oblasti dopravy. Jedním z efektivních prostředků matematického modelování je i sestavený model pro sestavu signálních plánů při světelném řízení křižovatek. Zatím však byly tyto modely testovány pouze v podmínkách izolovaných křižovatek nebo při řešení liniové koordinace signálních plánů v případě dvou křižovatek.

Cílem práce bylo prověřit uplatnitelnost metod lineárního programování při řešení časové koordinace signálních plánů v podmínkách trojúhelníkové konfigurace křižovatek a prověřit účinnost koordinace v závislosti na vybraných topologických parametrech okolní sítě.

Prokázalo se, že metody lineárního programování, konkrétně model, který byl v minulosti sestaven řešitelským týmem prof. RNDr., Jana Černého, Dr.Sc., Dr.h.c. je natolik univerzální, že umožňuje provádět i plošnou koordinaci křižovatek. I přes všechny nedostatky, které lineární modely mají, se jedná o velmi zajímavé zjištění, které umožní rozvíjet problematiku plošné koordinace dopravních proudů. Zjištěné výsledky ukazují, že lineární programování má i nadále vysoký potenciál uplatnitelnosti při řešení praktických problémů.“

Do budoucna je však třeba provést ještě další experimenty, nejlépe v podmínkách konkrétní dopravní sítě, které by slibné výsledky získané v předložené práci potvrdily.

Seznam použité literatury

- [1] Medelská, Viera; Jirava, Petr; Nop, Dušan; Rojan, Jiří. Dopravné inžinierstvo. Bratislava: ALFA, 1991. 1. vydání, 376 s. ISBN 80 –05 –00737-X
- [2] Černý, Jan ; Kluvánek, Pavol. Základy matematickej teórie dopravy. Bratislava: VEDA. 1990. 279 s. ISBN 80 – 224 –0099 - 8
- [3] Podklady spoločnosti Ostravské komunikace a.s.
- [4] Technické podmínky TP 81 Navrhovanie svetelných signalizačných zariadení pro řízení silničního provozu.
- [5] ČSN 736021: 1994 Světelná signalizační zařízení. Umístění a použití návěstidel.
- [6] ČSN 736110: Projektování místních komunikací

Seznam příloh

Příloha 1: Výsledky experimentů ke zjištění průběhu minimální poměrné rezervy a délky cyklu při změnách doby potřebné k průjezdu mezikřižovatkové vzdálenosti v intervalu 10 – 130 s

Příloha 2: Výsledky experimentů ke zjištění průběhu minimální poměrné rezervy a délky cyklu při změnách doby potřebné k průjezdu mezikřižovatkové vzdálenosti v přípustném pásmu koordinovatelnosti

Přílohy jsou uvedeny na CD přiloženému k textu diplomové práce.